

Gelencsér András

Füstbe ment bolygó



Pannon Egyetemi Kiadó

Gelencsér András
Füstbe ment bolygó

Támogatók:

TÁMOP-4.2.4 A/2-11-1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti
Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi
támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése

konvergencia program

Európai Unió

Európai Szociális Alap

Magyar Tudományos Akadémia

Copyright ©Gelenicsér András
Copyright ©Pannon Egyetem Kiadó

Minden jog fenntartva

Lektorálta: Mészáros Ernő

Kiadja a Pannon Egyetemi Kiadó
8200 Veszprém, Egyetem u. 10 Pf. 158.
Telefon/fax: 88/624-000/4133
E-mail: kiado@almos.uni-pannon.hu
<http://konyvtar.uni-pannon.hu/hu/kiado>

Borítótervezés: Tradeorg Kft.
Felelős kiadó: Garaczi Inre kiadóvezető

ISBN 978-963-396-069-1

Nyomda munka:
Pannon Egyetemi Nyomda
Felelős vezető: Szabó László

Füstbe ment bolygó

Gelencsér András

levegőkémikus, egyetemi tanár

MTA-PE Levegőkémiai Kutatócsoport

Pannon Egyetem

Pannon Egyetemi Kiadó, Veszprém, 2015

Tartalomjegyzék

Előszó	7
I. FEJEZET	
A földi légkör	11
II. FEJEZET	
Elsődleges (klasszikus) levegőszennyezés	29
III. FEJEZET	
REGIONÁLIS LEVEGŐSZENNYEZÉS	43
3.1. fejezet. A savas eső	43
3.2. fejezet. A fotokémiai (Los Angeles típusú) szmog	49
IV. FEJEZET	
Nagyléptékű levegőszennyezés	61
4.1. fejezet. Biomassza égetés	62
4.2. fejezet. Az arktiszi szmog	67
V. FEJEZET	
Globális levegőszennyezés	71
5.1. fejezet. A sztratoszferikus ózonszint változásai, az ózonlyuk	71
5.2. fejezet. Az üvegházhatású gázok koncentrációváltozásai	81
VI. FEJEZET	
A légköri összetétel és az éghajlat kapcsolata	95
6.1. fejezet. Az éghajlatváltozás tényezői	95
6.2. fejezet. Az éghajlati tényezők szerepe a földtörténeti múltban	105
6.2.1. fejezet. Levegőszennyezés vulkánkitörések	105
6.2.2. fejezet. Üvegházhatás a földtörténeti múltban	108
6.2.3. fejezet. Csillagászati tényezők és visszacsatolási folyamatok kombinációja	112

6.3 fejezet	Az emberi tevékenység hatása az éghajlatra.....	115
6.3.1 fejezet	A levegőszennyezés.....	115
6.3.2 fejezet	A többlet üvegházhatás.....	118
6.3.3 fejezet	Collagénzati tényezők helyett az ember?	127
6.4 fejezet	Epiológus.....	129
Ajánlott irodalom		132
Köszönetnyilvánítás		134

ELŐSZÓ

Változnak az idők: a múlt század végéig az embereket a léggel kapcsolatban kizárólag az időjárás érdekelte, az viszont közöttük állandó beszédtema volt. Ahogy Mark Twain találóan mondta, „időjárás az, amiről mindenki beszél, de senki nem tesz érte semmit”. Az időjárásról a múltban szó szerint élet-halál függött: nem véletlen, hogy a bibliai csapások között több, az időjárással összefüggő jelenség szerepel. Az emberek évezredekig csak a környezetükben zajló időjárási jelenségekről szerzhettek tudomást. Kétségtelen tény, hogy a média révén ma már a világban bárhol bekövetkező szélsőséges időjárási események hatásairól azonnal értesülhetünk, különösen, ha súlyos emberáldozatokkal és anyagi károkkal járó jelenségekről van szó. Ez orrnagában is azt a benyomást kelthetné bennünk, hogy az időjárási szélsőségek gyakoribbá válnak. De vajon nem arról van szó, hogy csak többről és hamarabb szerzünk tudomást? Szeretni már régóta szeretnénk, de vajon tudjuk-e az időjárási folyamatokat érdemben befolyásolni?

Ennek a kérdésnek a megválaszolásához vissza kell kanyarodnunk a levegő fogalmához, amiről, tegyük a kezünket a szívunkre, vagy a keveset tudunk. Sőt, a közfelfogás a levegőt gyakran a semmivel azonosítja, amint az a „levegőnek nézte” szólásban is tükröződik. Az azért sokak számára közismert, hogy felfelé haladva ritkább a levegő és hidegebb van, ha máshonnan nem, hát a hegymászók történeteiből és tragédiáiból. Iskolai tanulmányaiból szinte mindenki tudja, hogy a levegő, illetve a benne található oxigén a növények és állatok (és így az ember) számára egyaránt nélkülözhetetlen. Arra már valószínűleg kevesebben emlékez-

nek, hogy a levegő nagyobb része nitrogénből áll. Érdekes gondolatki-
sértet lenne, hogy a globális felmelegedés körül keltett médiaérdeklődés
mellette hányan tudnának a levegőben előforduló további gázokat felszo-
rolni, és mit tudnának azok természeti hatásáról?

Nem vállalok különösebb kockázatot, ha azt állítom, hogy nem so-
kan és nem sokat, a hatásokról pedig a meteorológusokon és néhány
rokon szakma képviselőin kívül korábban szinte senki nem is hallott.
Bevallom, nekem sincsenek ilyen emlékeim középiskolai tanulmányaimból,
az 1980-as évek elejéről. A légkör, mint természeti szféra
alapvető működése a földrajz éghajlatleírásán kívül egyszerűen kima-
radt az iskolai oktatásból. Ez az állapot egészen az ezredfordulóig
fennállt, amikor a médián keresztül berobbant a köztudatba a „globális
felmelegedés” vagy „globális klímaváltozás” fogalma. Természe-
sen, ahogy az ilyenkor lenni szokott, egyből mindenki megvilágosult,
a téma avatott szakértőjévé vált.

Megtudtuk, hogy a szén-dioxid a fő bűnös, ami káros üvegházha-
tást fejt ki, ezért melegszik a légkör. A szén-dioxidot az autók és a
kémények bocsátják ki, mégpedig nyilván minél többet, amél melegebbnek
kellene lennie. Mások azt mondják, hogy mi emberek leg-
alább annyi szén-dioxidot lélegzünk ki, mint amennyit az autók kiboc-
sátanak, tehát nem is kell tennünk semmit. Nincs is felmelegedés, il-
letve ha mégis van, azt nem mi emberek okoztuk, régen is voltak éghajlati
változások. Ember legyen a talpán, aki ezek között az ellent-
mondások között lép és kizagozni. Ráadásul úgy, hogy hézagos ismereti
döntően a médiából származnak, ezen kívül legfeljebb a múltbeli
időjárásra vonatkozó szubjektív tapasztalataira támaszkodhat. A téma
szó szerint hamar „felforrósodott”, a vitába kulcsozó érdekesoportok
és politikai pártok is beszálltak. Ettől sem lett tisztább a kép természeti
folyamatokról nem lehet érzelmsleg fűtött, hitbéli vitát folytatni.
Nem túlzás azt állítani, hogy az emberek többsége nincs tisztában a
Föld-légkör rendszer alapvető működésével sem, mégis sokaknak ha-
tározott véleménye van például a globális klímaváltozásról, annak
okairól és következményeiről.

Ennek a bátor megnyilvánulásnak a legfőbb oka nyilván az, hogy
a légkör túlságosan is a szemünk előtt van. Látjuk, érzékeljük és néha
elszenvedjük a benne lejátszódó *fizikai* folyamatokat, ami időjárásnak

nevezünk. Érzékeljük a Nap sugárzását és melegét, de azt már nem látjuk, hogyan eszi csapdába a léggör néhány kismennyiségben előforduló alkotója a felszínről kisugárzott energiát. Arrát nem látunk, az vajon nem létezik? Ellusszuk, hiszen a médiából halljuk és a saját szemünkkel is láthatjuk, hogy a városi szmog a járművek kipufogógázából és kéményekből származik. Az ok-okozati összefüggés a napnál is világosabb, nyilván senki nem fogadna el olyan magyarázatot, hogy tőlünk független természeti folyamat okozza. Pedig részben sajnos így van. A savas esőt is a kéményekből származó füstgázok okozzák, kétség sem fér hozzá. Érdekes módon valamiért azt is ellusszuk, bár nem láthatjuk, hogy az ózonlyukat a freonok okozzák. De egyáltalán létezik az ózonlyuk, vagy csak azért találták ki, hogy ezzel jobban el lehessen adni különféle dezodorokat és naptejeket? Akár kételkedhetnénk is benne, hogyan lenne képes pár ezer tonna freon odafent ekkora kárt csinálni? Hiszen az ember egy ekkora hatalmas rendszerben, mint a léggör, hogyan tudna bármit is előidezni? Hogy egy, a globális klímaváltozás témájához hozzászóló magabiztos olvasót idézzek: „A Föld hatalmas energiáját a Nap biztosítja – az emberiség ezt keptelen befolyásolni. Merjünk kicsik lenni!” De vajon valóban kicsik vagyunk? Egyedül nyilvánvalóan igen, de ennyien?

Miután sikerült kellőképpen elbizonytalanítanom a kedves Olvasót, ideje, hogy meghatározzuk e könyv műfaját. Címe és még inkább címlapja alapján biztosan akad olyan olvasó, aki azt feltételezi, hogy valamiféle világegye-prófécia talán a kapzsi emberiség mohóságában ténylegesen a léggört (is), elfogyasztjuk az oxigént vagy a szmogban megfulladunk? Mások talán éppen ellenkezőleg arra gondolnak, hogy hátha éppen ez a könyv számol le a tudósok globális felmelegedéssel kapcsolatos világméretű összeesküvésével – le a technológiai fejlődést bűnbakká kialakító veszmadarakkal! Még hogy az emberiség befolyásolni tudna hatalmas léptékű léggöri jelenségeket, ez nevetséges!

Nos, mindkét székértáborot ki kell ábrándítanom, a könyv egyszerűen egy *jobbízoroson rendhagyó* ismeretterjesztő mű. Rendhagyó egyrészt abban az értelemben, hogy nem törekszük az ember és a levegőkörnyezet kapcsolatának minden részletre kiterjedő, tudományos igényű tárgyalására. Ezt helyette számos kiváló monográfia és tankönyv megteszi. Ehelyett az emberi tevékenység levegőkörnyezetre

gyakorolt hatásával kapcsolatos kozmert fogalmakat – például szmog, ózonlyuk, savas eső, globális felmelegedés, stb – vesz görcsö alá: vajon helyesek-e a róluk alkotott ismereteink? Más tudományos művekkel szemben nem hagyja figyelmen kívül a médiában és a világhálón keringő laikus érveket sem: reflektál rájuk, pontosítja vagy cáfolja őket. Ezt azonban nem tudományos kinyilatkoztatással teszi, hanem az Olvasóra bizza, hogy a gondosan és közérthetően bemutatott ismeretanyag alapján mit itél róluk. A bonyolult légköri folyamatok és összefüggések bemutatására néha meglepően egyszerű, hétköznapi, gyakorlatban is megvalósítható fizikai kísérleteket mutat be. Manapság rendhagyónak számít e könyv abban a tekintetben is, hogy szerzője levegőkémikus, egyetemi tanár, a tudományterület aktív művelője, ami sajnos napjainkban tudományos könyvek szerzőitől nem feltétlenül elvárt követelmény.

Ez a könyv tehát az ismeretterjesztésben meglehetősen szokatlan *impresszionista* irányzatot képviseli, ami alapján remélhetőleg képet kap a kedves Olvasó a Föld-légkör rendszer bonyolult működéséről és az emberi tevékenység következményéről. A cselekmény a tudományos módszerekkel vizsgálható múltban és a megfigyelésekkel alátámasztható jelenben játszódik, a jövő az Olvasó fantáziájára van bízva. Aki végigolvassa a könyvet, minden bizonnyal megérti, hogy miért. A könyv elsődleges célja a szemléletformálás, annak tudatosítása, hogy napjainkban az emberi tevékenységek *összetartója* igenis képes érzékelhető változásokat előidézni olyan hatalmas természeti rendszerben is, mint a légkör. Ennek megértése nélkül aligha lehet reményünk arra, hogy természethez fűződő viszonyunk saját érdekünkben mielőbb megváltozzon. Éppen ezért különösen ajánlom ezt a könyvet diákoknak, hallgatóknak és tanároknak, akik a jövőt képviselik, illetve a felnövekvő generáció szemléletét formálják.

Kelt Veszprém, 2014. október 31.

Gelencsér András

I. FEJEZET

A FÖLDI LÉGKÖR

A légkör jelentősége

A földi légkör a legelterjedtebb fogalmi meghatározás szerint a Földet körülvevő gázburok. Légkörük más bolygóknak is van, a Föld légköre mégis abban különbözik tőlük, hogy az élet számára alkalmas körülményeket biztosít bolygónkon. Ez nemcsak abban merül ki, hogy a földi légkör más bolygóktól eltérően jelentős arányban tartalmaz az összetett élőlények számára nélkülözhetetlen oxigént, hanem számos más védelmi és szabályozási funkciót is ellát. Ezek nélkül a Földön az élet – legalábbis annak egyszerű formáit leszámítva – nem fejlődhetett volna ki és maradhatott volna fenn. Nézzük tehát, hogy a bioszféra jelenlegi állapotának fennmaradásához a légkör milyen módon járul hozzá.

A földi légkör „funkciói”

- 1) A Föld légköre és annak alkotói (nitrogén, oxigén, szén-dioxid, vízgőz) még a felső légkörben teljes mértékben kiszűrrik a Naptól érkező nagy energiájú (in. ionizáló sugárzást, ami az élő sejteket elpusztítaná).

Fizibe ment bolygó

- 2) A légkör biztosítja a légzés és bontás számára szükséges oxigént.
- 3) A magaslégkörben, a sztratoszférában az oxigénből képződő ózon elnyeli az ultraibolya sugárzás a sejtek örökítőanyagát károsító komponensét (az ún. UV-B sugárzás nagy részét és az UV-C sugárzás egészét), ezáltal lehetővé téve a szárazföldi élet fennmaradását.
- 4) A légkörben kis mennyiségben található alkotók (a vízgőz, a felhők, a szén-dioxid és néhány egyéb nyomgáz) az ún. üvegházhatáson keresztül szabályozzák a Föld felszíni hőmérsékletét. Nélkülük a Föld átlaghőmérséklete a jelenleginél 32°C -kal alacsonyabb lenne ($+15^{\circ}\text{C}$ helyett -17°C), vagyis a ma ismert földi élet számára jórészt alkalmatlan.
- 5) A légkör biztosítja a víz körforgását, ezen keresztül a szárazföldi élet egyik alapvető feltételét.
- 6) A légkörben kis koncentrációban megtalálható szén-dioxid a növényi fotoszintézis alapanyaga, amiből az összetett élő szervezetek felépítő szerves anyagok származnak.
- 7) A légkörben állandó ontisztulási folyamat zajlik. Más szavakkal a légkör fizikai és kémiai folyamatai segítségével megakadályozza, hogy a nagy mennyiségben (pl. vulkánkitörésből) a levegőbe kerülő mérgező gázok feldúsuljanak és az összetett élőlények számára alkalmatlan körülmények alakuljanak ki.
- 8) A légkörben jelentős mértékű hőszállítás történik, ami az Egyenlítő és a sarkok között számottevően mérsékli az eltérő mértékű besugárzásból adódó hőmérsékleti különbségeket, továbbá a légkör az időjárási folyamatok színtere.
- 9) A légkör fontos szerepet tölt be a különböző ökoszisztémák a szükséges táp- és nyomelemekkel történő ellátásában.

Az életadó légkör

Láthatjuk tehát, hogy a légkör léte és összetétele a földi élet számára elengedhetetlenül fontos. Amennyiben a fenti feltételek bármelyike nem teljesülne, akkor kizárható, hogy a földi élet a jelenleg ismert formájában fennmaradhasson. Ha egy gondolat kísérletben egyesével kiküszöböljük a légkör fent felsorolt hatásait, akkor közöttük találunk olyat, ami azonnal véget vetne mindennek, de olyat is, ami csak évmilliók múlva tenné lehetetlenné az élet fennmaradását. Akiben nagyon erős a technológiai fejlődés mûvelhetőségébe vetett hit, az talán még azt is gondolhatná, hogy a légkör bizonyos funkciói mestersegesen is biztosíthatók lennének (pl. öntözés, tápanyagszállítás, levegőtisztítás). Sajnos ez, mint látni fogjuk, teljességgel lehetetlen, a légkör egyetlen funkciója sem nélkülözhető az élet fennmaradásához.

Az emberi beavatkozások

Most, hogy rögzítettük a Föld légköre pótolhatatlanságának tényét, nézzük végig újra a légkör felsorolt funkcióit és tegyük fel magunknak a kérdést: közülük melyekről véljük úgy, hogy az emberiség tevékenységei révén valamilyen módon képes érdemben befolyásolni őket? Az eredmény megdöbbentő: a felsorolt kilenc nélkülözhetetlen funkció közül jelenlegi ismereteink szerint *hat* (!) esetében érdemnek tekinthető az emberiség tevékenységének befolyása, mindössze kettő esetében 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 szén-dioxid mennyiségét, az öntisztulás képességét és a tápanyagok szállítását érintik. A felső légkör nagy energiájú sugárzásszűrő képességét, valamint a légkör oxigén koncentrációját az emberiség tevékenységeinek össz-

¹ Élet alatt az egyszerűség kedvéért a bioszféra jelenlegi állapotát értjük, az emberiséget is beleértve.

szessége sem képes érdemben befolyásolni. Az pedig jelenlegi ismereteink szintjén egyelőre bizonytalan, hogy globálisan a légköri hőszállítás az emberi tevékenység hatására eddig milyen módon és mértékben változott.

Az emberiség, mint globális természetalakító tényező

Ijesztő belegyőzödni, hogy e nélkülözhetetlen és hatalmasnak tűnő gázburkok állapotában az egyre fokozódó léptékű emberi tevékenység alig néhány évtized leforgása alatt máris milyen változásokat volt képes előidézni. Nem is feltétlenül az eddig bekövetkezett változások mértéke, hanem a ténye az, ami figyelmet érdemel. Az emberiség történelmének során ugyanis korábban még soha nem akadt példa arra, hogy a hatalmasnak vélt természetet bármilyen módon befolyásolni tudja. Kinek jutna eszébe például vulkánkitöréseket, földrengéseket vagy akár az ár-apály jelenségét emberi tevékenység mellékhatásának tulajdonítani? Eppen ellenkezőleg, mindig is az ember volt kiszolgáltatva a természet szélsőségeinek. Napjainkra az *egyes* emberek természettel szembeni kiszolgáltatottsága – legalábbis a modern civilizációs társadalmakban – jelentősen mérséklődött. Az egész emberiség természetnek való kiszolgáltatottsága ezzel egyidejűleg ugyanakkor számottevően növekedett – gondoljunk csak bele, napjainkban hetmilliárd emberek kell folyamatosan élelmiszert termelni, megfelelő otthonról és egészséges ivóvizről gondoskodni. Globális léptékű és kedvezőtlen irányú környezeti változások esetén nincs hova odébbállni, mint egykoron a nomád népeknek.

A láthatatlan földi szféra

Miután a Föld légkörének az élet szempontjából betöltött nélkülözhetetlen szerepét beláttuk, vizsgáljuk meg, hogy tulajdonképpen milyen is az a szféra, ami ezeket a pótolhatatlan funkciókat ellátja. A

legfontosabb tulajdonsága – minden más földi szférával ellentétben – az, hogy számunkra lényegében láthatatlan. A légkör fő alkotói ugyanis átengedik a Naptól (és más csillagokból) érkező sugárzás az ún. *látható tartományba* eső részét². A láthatatlanság, távoli hatalmas égitestek látványával együtt azt a képzetet erősíti az emberi tudatban, hogy a légkör végtelen³. Más kérdés, hogy végtelenség érzete az ember számára az óceánok látványával is együtt jár, itt a hatartalanság az, ami ezt a tudatot erősíti.

Van-e a légkörnek határa?

De valóban hatartalan-e a légkör? Szigorúan véve az, hiszen a világűr felé nincs jól definiált külső határa: a levegő növekvő magassággal egyre ritkul, összetételét és állapotát tekintve fokozatosan olvad bele a bolygóközi térbe. Ez azonban nem jelenti azt, hogy a légkör kiterjedése végtelen. A légkör külső határát csillagászati értelemben abban a magasságtartományban szokás meghúzni, ahol már a bolygó gravitációs tere nem képes visszatartani a légkört alkotó gázok közül a legkönnyebbeket⁴. Ez az ún. *exoszféra*, hozzávetőlegesen a 400–500 km-es magasság fölötti tartomány.

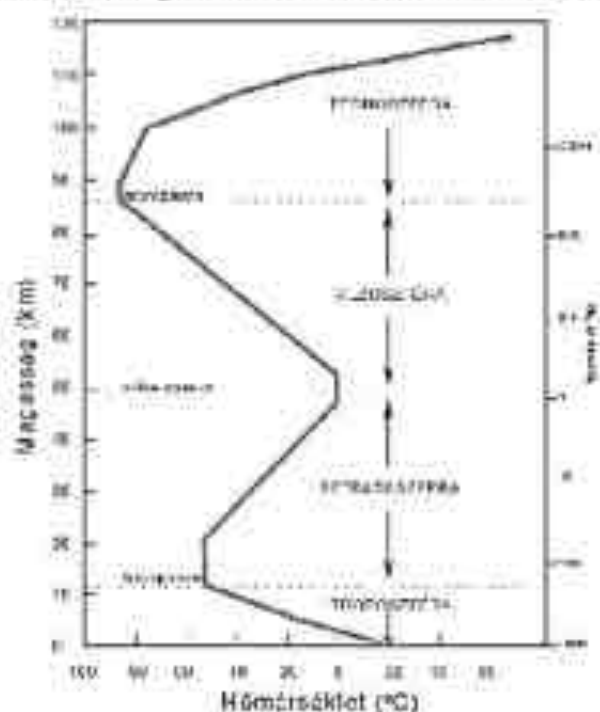
² A légkör alkotói azonban a Nap sugárzás spektrumának más részeit, a már említett nagy energiájú sugárzást és az ultrabolya sugárzás UV-C tartományba eső hányadát teljesen, míg az UV-B tartományba eső ultrabolya sugárzást és az ún. közeli infravörös sugárzást nagy részben elnyelik. Tehát ha szennünk ezekhez a tartományokhoz alkalmazkodott volna, akkor számunkra már korábban lenne átjárható a légkör.

³ Már amióta a légkör létezésére az ember számára egyáltalán felfogható.

⁴ A Föld esetében az atomos hidrogént és a héliumot.

A légkör tartományai

Hasonló eredményre jutunk, ha a légkört a hőmérséklet magasság szerinti változásának előjele alapján osztjuk különböző tartományokra. Ez a legelterjedtebb tárgyalásmód, ami napjainkban az általános és középiskolai oktatásban is meghonosodott, a légköri folyamatok értelmezésének pedig több évtizede az alapja. A felszínhez legközelebb található tartományok idegen elnevezései (troposzféra és különösen a sztratoszféra) pedig ma már a köznyelvbe, a sajtónyelvbe, sőt a modern előadóművészetekbe³ is beszivárogtak. Ez persze – más jelenségekhez hasonlóan – korántsem jelenti azt, hogy az emberek többsége a fogalmak miibenlétével tisztában lenne. A légkör függélyes hőmérsékletváltozás szerinti tagolását vázlatosan az 1. ábra szemlélteti.



1. ábra

A légkör tartományait a hőmérséklet magasság szerinti változása alapján.

³ „... korlátok nélkül növekszik egyre, a sztratoszférán át tor a végtelenbe...”, Vad Fruttik: Lehetek én is.

Troposzféra, sztratoszféra

Troposzférának a légkör földfelszín fölötti alsó tartományát nevezzük, ahol a hőmérséklet növekvő magassággal csökken (megközelítőleg kilométerenként $6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal). A troposzférát (különösen annak alsó részét) intenzív légköri keveredés jellemzi, innen származik az elnevezése is (a *troposz* szó görögül forgót jelent). A troposzféra magassága $10\text{--}18\text{ km}$ közötti (a nagyobb érték az Egyenlítőn), felülről a tropopauza határolja ($-56\text{ }^{\circ}\text{C}$).

A tropopauza fölött található a sztratoszféra, amelyben a hőmérséklet a magassággal együtt növekszik. Az ehhez szükséges energia közvetlenül az ebben a tartományban található ózonsztratoszféra nap sugárzás elnyeléséből származik. A sztratoszférában nincs feláramlás (konvekció), ezért rendkívül stabil szerkezetű. Neve a görög *sztratosz* (retegezett) szóból származik, 50 km -es magasságig terjed, felülről a sztratopauza határolja.

A felső légkör, mezoszféra, termoszféra, exoszféra

A sztratopauza fölött mintegy 80 km -es magasságig terjed a mezoszféra, ahol a hőmérséklet a magassággal ismét csökken, amit a mezopauza zár le. E fölött a hőmérséklet a magassággal ismét növekszik (a Naptól érkező nagy energiájú ionizáló sugárzás közvetlen légköri elnyelése miatt), ez a tartomány a termoszféra. A termoszférának nincs külső határa, több száz km-es magasságban az exoszférával fed át (ami nem a magasság szerinti hőmérsékletváltozás alapján, hanem csillagászati értelemben definiált külső légköri tartomány). Mindkét definíció azt sugallja, hogy a légkör külső határa valahol több száz km-es magasságban húzódik, azaz hatalmas kiterjedésű földi szféráról van szó. Ez a szemlélet is látszólag a légkör végtelenségére és sebezhetetlenségére vetett hitet erősíti.

A légnyomás

A légnyomás a légkör egyik legismertebb és közvetlenül mérhető tulajdonsága. Az a tény is jól ismert, hogy légnyomás a tengerszint feletti magassággal exponenciálisan csökken: a légköri nyomás tengerszinten 1015 hPa, a Mount Everest csúcsán már csak annak kb. egyharmada, a sztratoszféra felső részén (kb. 50 km-es magasságban) már csak kb. az ezredrésze. A légköri nyomás tulajdonképpen a légkör egységnyi felületre nehezedő súlya, tengerszinten négyzetcentiméterenként kb. 100 N, ami 10 m magas vízoszlop súlyának felel meg. Ezt a nagy nyomást a levegőben azért nem érezzük, mert szervezetünkben bonyolult mechanizmusok azonos mértékű ellennyomást⁶ alakítanak ki. Időjárási frontok esetén, illetve azokat megelőzően a légnyomás gyorsan változhat, ezt azonban az emberi szervezet belső kompenzáló mechanizmusa: csak lassan képesek követni. Egyebek között ezért is alakulhat ki az arra érzékenyeknél frontérzékenység a maga jellemző tünetével.

A légkör „vastagsága”

Sajnos a légkör nyomás magasság szerinti változását és ebből adódóan a légkör, mint földi szféra sűrűségeloszlásának nagyfokú terjedését (inhomogenitását) az oktatásban használatos tankönyvek nem is tárgyalják. Pedig ez egyszerűen abból a fizikai tényből következik, hogy a levegő összenyomható, és saját súlya alatt össze is nyomódik.⁷

A légkör vastagságának, mint – egyébként a valóságban fizikailag nem létező – fogalomnak a használata a nem szakmabeliek körében ko-

⁶ Ezt történhet meg az, hogy vákuumban az élő szervezetek a nyomáskülönbségtől egyszerűen szétrobbannak.

⁷ A légkör felépítését a legzseniletezőbben bemutató egyszerű tárgy egy vékony papírból készített, harmonikászerűen előhátagatott papírhenger.

mely problémát jelenthet a légkörben lejátszódó folyamatok és különösen az emberi tevékenység a légkörre gyakorolt hatásainak értelmezésében. A vastagság szó hallatán a legtöbb embernek más tapasztalat hiján ugyanis valamilyen egynemű és adott tulajdonságú anyag jut az eszébe, mintha egy, a Földet körülölelő paplanról lenne szó. Még azok közül is sokan ebbe a hibába esnek, akik egyébként tisztában vannak azzal, hogy a levegő nyomása a tengerszint feletti magassággal csökken.

A légkör tömege

Ugyancsak kevéssé ismert, hogy a légkör legnagyobb pontossággal meghatározható fizikai tulajdonsága a teljes tömege. A légnyomást ugyanis úgy kapjuk meg, ha a légkör felszínre nehezedő súlyát elosztjuk a Föld felületével:

$$p = \frac{M \times g}{4 \times R^2 \times \pi}$$

ahol p a felszíni légnyomás (Pa), M a légkör tömege (kg), g a nehézségi gyorsulás ($9,81 \text{ m/s}^2$), R a Föld sugara (6370 km). Behelyettesítve a légkör teljes tömegére $5,3 \times 10^{21}$ kg adódik. Más mértékegységben kifejezve a légkör tömege 5300 billió tonna. Ez emberi léptékekkel kifejezve elképzelhetetlenül hatalmas mennyiség, a legnagyobb emberi alkotás, a Kínai Nagy Fal tömegének hatezerszerese. De a földi szférák között ez a tömeg elenyésző: egyedül a bioszférát előzi meg, amelynek összes tömegénél 3 milliószor nagyobb. Az óceánokkal történő összehasonlításnál vegyük figyelembe, hogy a légköri nyomás vízoszlop-egyenértékben egy mindössze 10 m magas vízoszloppal helyettesíthető lenne. Az óceánok a Föld felszínének 2/3-át borítják és átlagos mélységük 3700 méter. A Föld óceánjainak összes tömege 260-szorosa a légkör teljes tömegének. Ha belegondolunk abba, hogy a földi élet számos feltétele a mindössze 10 m magas vízoszloppal azonos tömegű légkörtől függ, akkor már korántsem tűnik annyira sebezhetetlennek, mint ahogy nem is az. A légkör teljes tömegének 90 %-a a troposzférában, további 9,9 %-a pedig a stratoszférában található, a mezoszféra és a termoszféra

hatalmas kiterjedésük ellenére csak a légkör rendkívül csekély tömeghányadát képviselik. Az emberi tevékenység légkörre gyakorolt hatása szempontjából ezt a két fő tartományt kell figyelembe vennünk.

A Föld-légkör rendszer

A többi szférához képest rendkívül kis tömege, dinamikus jellege és a felsorolt funkcióiban megnyilvánuló kölcsönhatások miatt a légkör gyakorlatilag *nem tekinthető önálló földi szférának!* A szakmailag helyes megnevezés a *Föld-légkör rendszer*. 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 hőszállításai részt vesz a felszín hőmérsékletének vagy halmazállapotának megváltoztatásában. Közismert és hatalmas léptékű a víz körforgásában betöltött szerepe (évente 500 ezer köbkilométer víz⁸). A víz körforgásához a légkörben a Föld energiamérlegét és így hőmérsékletét döntően befolyásoló folyamatok kapcsolódnak, például a felhők képződése. Azt szinte csak a szakmabeliek tudják, hogy a légkör és a földfelszín között szinte felfoghatatlan mértékű *energiaforgalom* is zajlik ($1,6 \times 10^{17}$ W, az emberiség teljes energiatermelésének tízmillioszorosa). Ez másképp azt jelenti, hogy a Napból érkező összes sugárzási energia 94 %-a kicserélődik az alsó légkör és a földfelszín között! A légkör és a felszín közötti *anyagforgalom* legismertebb 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 következik be (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.

⁸ Összehasonlításképp a Balaton vizének térfogata mindössze 2 köbkilométer.

A légköri folyamatokkal kapcsolatos várakozások

Sajnos a mindent a végtelenség egyszerűsítő emberi gondolkodás és azt leképező média nem tud mit kezdeni egy ilyen bonyolult és összetett rendszerrel, számukra a légkör egyszerűen az a szféra, ahol az időjárás folyamatok zajlanak. Ebből a felfogásból adódik az a túrealmetlen várakozás, hogy ha a légkörbe juttatunk valamit, akkor annak a 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 veszik, hogy a szén-dioxid nem is üv egháztartási gáz. Pedig ez a közvetlen (és egyedül belátható) ok-okozati összefüggés csak a helyi levegőszennyezés esetében (például London-típusú szmog, lásd 2. fejezet) teljesül. Az ózonsztréteg vékonyodása, bár a magaslégtérben zajlott az emberiség által a levegőbe bocsátott gázok hatására, több évtizedes kísérlettel következett be (lásd 5.1. alfejezet). Az éghajlatváltozás esetében pedig a leglátványosabb változásokat nem is a légkör produkálja (lásd 6.3.2. alfejezet). Egyébként is, olyan hatalmas kiterjedésű, kaotikus rendszereknél, mint amilyen a légkör, az ok-okozati összefüggés a legtöbbször esetben lineáris.

A levegő összetétele

A „légkör” és a „levegő” fogalma úgy viszonyul egymáshoz, ahogy az „óceán” a „tengervízhez”: a levegő a földi légkört kitöltő, szilárd és folyékony részecskéket⁹ és vízcseppeket¹⁰ is tartalmazó különleges gázkeverék. Levegő csak a Földön van, más bolygók esetében a légkör összetételéről beszélünk. A levegő alkotói és azok arányai rendkívül

⁹ Ezeket aeroszol részecskének nevezzük, ismertebb formák például a por-, a korom- és a füst részecskék. Méretük 1 nanométertől néhány száz mikrométerig terjed. Rendkívül fontos szerepet töltenek be alapvető légköri folyamatok szabályozásában, például a felhőképződésben, a felzáró eléré nap-sugárzás mértékének a szabályozásában.

¹⁰ A felhő- és ködcspepeket a légköri rendszer önálló elemeinek tekintjük.

Fizike ment bolygó

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 levegő átlagos összetételét az 1. táblázat mutatja, az alkotók gyakoriságának sorrendjében.

1. táblázat

A földi légkör átlagos összetétele (a levegő) száraz állapotra vonatkoztatva. Vastag betűvel a levegő fő összetevői (gyakoriságuk legalább 1%), dőlt betűvel a nemesgázok, a többi összetevő kisebb mennyiségben előforduló ún. nyomgáz.

Összetevő	Koncentráció
Nitrogén	78%
Oxigén	20,9%
Argon	1%
Szén-dioxid	0,04% = 400 ppm ¹¹
<i>Neon</i>	<i>18 ppm</i>
<i>Hélium</i>	<i>5,2 ppm</i>
Metán	1,8 ppm
<i>Kripton</i>	<i>1,1 ppm</i>
Kén-dioxid ¹²	1 ppm
Hidrogén	0,5 ppm
Dinitrogén-oxid	0,3 ppm
Ózon ¹³	0,3 ppm

¹¹ 1 ppm (parts per million, egymilliomod térfogatrés, egy tizedred %) azt jelenti, hogy egymillió molekula közül egyetlen az illető gáz molekula.

¹² Legközelebb előfordulása nem egyenletes, inkább a felszín közelébe levegőben fordul elő.

¹³ Összes mennyiségének több mint 90 %-a a magaslégtérben (sztratoszférában) található.

A vízgőz

A Földön hatalmas mennyiségben előforduló fontos vegyület nem szerepel a táblázatban, a víz¹⁴. Átlagos légköri mennyisége (27 kg/m^3) alapján közvetlenül az argon után és szén-dioxid előtt következne. Légköri koncentrációja 0 és 4 % között változhat, im erősen változó¹⁵ összetevő. Ezért a levegő összetételét száraz levegőre vonatkoztatva szokás megadni, az alkotók mérése is kiszáritott levegőben történik. Valójában nagy nedvességtartalmú meleg levegőben a nitrogén és oxigén koncentrációja kisebb a táblázatban megadottnál, ezért érezzük fullasztónak a páras meleget, mert ilyenkor a beélegzett levegőben a sok vízgőz miatt a megszokottnál viszonylagosan kevesebb az oxigén. A vízgőz (valamint a belőle képződő felhők) a földi üvegházhatást a legnagyobb mértékben meghatározó légköri alkotó, a víz körforgásának légköri összetevője.

A levegő kémiai összetevőinek szerepe

A táblázatban dőlt betűvel jelölt nemesgázok (argon, neon, hélium, kripton) kivételével valamennyi alkotónak nélkülözhetetlen szerep jut a légkör fő funkcióinak ellátásában. A nitrogén biztosítja a légkör fő tömegét és nyomását, részt vesz az ionizáló sugárzás kiszűrésében, tápanyagot szolgáltat bizonyos szárazföldi növények számára. Az oxigén a légzéshez és bomláshoz nélkülözhetetlen, széles tartományban egyedül kiszűri az ionizáló sugárzást, belőle képződik folyamatosan az ózon. A vízgőz értelmesszerűen a víz körforgásának meghatározó eleme, a legfontosabb üvegházhatási gáz, a felhők révén a Föld által elnyelt energia mennyiségét alapvetően befolyásolja. Emellett részt vesz a légköri hő- és tápanyagszállításban. A szén-dioxid a növényi fotoszintézis „alapanyaga”, üvegházhatása révén részt vesz a felszíni

¹⁴ Mindhárom halmazállapotban előfordulhat, leggyakoribb formája a vízgőz.

¹⁵ A levegő nedvességtartalma földrajzi hely szerint, napszakosan és évszakosan szeles határok között változik.

Füstbe ment bolygó

hőmérséklet szabályozásában. A metán a légkör kémiai ontisztulásának szabályozásában tölt be fontos szerepet, emellett üvegházhatású gáz, sőt az ózonréteg szabályozásában is részt vesz. A kén-dioxid a szárazföldi növények számára szükséges nyomelem utánpótláshoz járul hozzá. A magaslégkörben a hidrogén fontos szerepet tölt be a nagy energiájú rövidhullámú sugárzás kiszűrésében. A dinitrogén-oxid az ózonréteg állapotát szabályozza, emellett üvegházhatású gáz. Az ózon egyedül elnyeli az ultraibolya sugárzás sejtek onkógenanyagát károsító komponensét, fenntartja a sztratoszférát. A levegő kémiai összetevőinek a légkör fő funkcióinak ellátásában betöltött szerepét a 2. táblázat szemlélteti.

*2. táblázat
A levegő kémiai összetevőinek szerepe a légkör alapvető funkcióinak ellátásában*

Légköri funkció	Kémiai összetevő								
	N ₂	O ₃	H ₂ O	CO ₂	CH ₄	SO ₂	H ₂	N ₂ O	O ₃
Nagy energiájú ionizáló sugárzás kiszűrése									
Légzés és bomlás számára oxigén biztosítása									
UV-B és UV-C sugárzás lassítása									
Üvegházhatás szabályozása									
Víz körforgása ¹⁸									
Fotoszintézis alapanyagának biztosítása									
Ontisztulás									
Hőszállítás									
Tápanyag biztosítás									

¹⁸ A kén-dioxidból képződő aeroszol részecskéken képződnek a felhőcseppek.

A légköri nyomgázok jelentősége

Az eddig elmondottakat összefoglaló táblázatból kitűnik, hogy a légkör a földi élet fenntartásához nélkülözhetetlen funkcióinak mindegyike (a hőszállítás kivételével) a levegő egy vagy több kémiai összetevőjéhez kötődik. Tehát onmagában nem a légkör, mint fizikai rendszer alkalmas a földi élet feltételeinek biztosítására, hanem a levegő bizonyos kémiai alkotói. Az is látszik a táblázatból, hogy a felsorolt kilenc közül öt alapvető feltétel teljesülését nem is a levegő fő alkotójának, hanem a kis mennyiségben előforduló ún. *nyomgázok* (a vizgőt is ide sorolva) jelenlétének köszönhetjük. Más szavakkal úgy is fogalmazhatnánk, hogy a földi élet mai formájának fennmaradását az oxigén mellett a levegőben előforduló nyomgázok biztosítják. Ezek mennyisége – amint azt az elnevezésük is mutatja – lényegesen kisebb, mint a levegő fő alkotóié. Valamely alkotó a levegőben található összes tömeget (M_i) megkaphatjuk, ha a légkör teljes tömegét megszorozzuk az 1. táblázatban található átlagos koncentrációval (keverési aránnyal), illetve az adott alkotó molekulatömegének és a levegő átlagos molekulatömegének a hányadosával:

$$M_i = M \times c_i \times \frac{m_i}{m_l}$$

ahol M a légkör teljes tömege ($5,3 \times 10^{18}$ kg), c_i az adott alkotó átlagos légköri koncentrációja (keverési aránya¹⁷), m_i az illető alkotó molekulatömege, m_l a levegő átlagos molekulatömege.

A légköri összetétel változása az ipari forradalom kezdete óta

A 3. táblázat a levegőt alkotó gázoknak a fenti képlet segítségével meghatározott összes légköri tömegét mutatja, illetve azt, hogy mennyiségük milyen irányban és mennyit változott az elmúlt 250 évben,

¹⁷ Az illető gáz molekulának aránya a levegőmolekulák számához képest.

Füstbe ment bolygó

döntően a hatalmas léptékűvé vált emberi tevékenységek eredőjének következményeként.

3. táblázat

A légkör kémiai összetevőinek teljes légköri mennyisége (tömege) és annak változása az ipari forradalom kezdete óta

Kémiai összetevő	Teljes légköri mennyiség napjainkban (milliárd tonna)	Változás az ipari forradalom kezdete óta (%)
Nitrogén	4 020 300	0
Oxigén	1 233 700	-0,05
Vizgőz	13 800	0
Szén-dioxid	3 240	+43
Metán	5	+250
Kén-dioxid ¹⁸	12	+300
Dinitrogén-oxid	2,6	+14
Ózon	2,7	-4

Látható, hogy a vizgőz kivételével valamennyi nyomgáz légköri mennyiségét az emberi tevékenység 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 üvegházhatásban módfelett aktívnak bizonyultak (lásd 6.3.2. alfejezet). Egyértelmű, hogy az elmúlt 250 évben a második legkisebb földi szféraként a légkör szenvedte el arányában a legnagyobb mér-

¹⁸ Legkisebb koncentrációját a vulkáni tevékenység időnként jelentős mértékben befolyásolhatja.

téki állapotváltozást. ennél nagyobbát 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 állandó¹⁹ és módfelett kedvező éghajlati viszonyok fennmaradásához hozzájáruló, 11 ezer éve stabil összetételbeli állapotból sikerült a Föld-légkör rendszert kimozdítani.

Az összetétel jelenkori változásai a földtörténeti múlt tükrében

Természetesen vannak, akik – az eddig elmondottakat nem vitatva – azzal érvelnek, hogy a földtörténeti múltban is széles határok között változott a nyomgázok koncentrációja a levegőben, volt a manál lényegesen nagyobb és kisebb is. Ez az állítás némely nyomgázra igaz, azonban az ezt bizonyító ismereteink szerint a földtörténeti múltban a légkör összetétele a manál lényegesen lassabb ütemben változott (még az eljegesedések és köctes melegebb időszakok között, geológiai léptékkel rendkívül gyorsnak számító összetételbeli változások is 40-szer lassabak lehettek a manál). Mint ahogy az is kétségtelenül tény, hogy a földtörténeti múltban a légkör lényegesen eltérő nyomgáz összetételéhez a Föld lényegesen különböző éghajlati állapotai tartoztak. Erre a témára részletesen a 6.2. alfejezetben visszatérünk.

¹⁹ Legalábbis a megelőző kétnullió évhez képest.

II. FEJEZET

ELSŐDLEGES (KLASSZIKUS) LEVEGŐSZENNYEZÉS

A kollektív tudat és a levegőszennyezés

Az előző fejezetben körüljártuk, hogy az emberek kollektív tudatában – akár hit alapján, akár természettudományos megfontolásból – az a sziklaszilárd meggyőződés tartja magát, hogy a „levegőég” a maga teljességében határtalan és végtelen. Nem is alaptalanul, ugyanis az egyes ember vagy kis emberi közösségek természethez fűződő viszonyában ez a felfogás tökéletesen megállta a helyét. Ezt a minden nyelv szerves részévé vált kifejezések, szólások is megerősítik: talán legkifejezőbb példája Margaret Mitchell híres regényének címe, az *Elfújta a szél* (*Gone with the wind*), ami azt sugallja, hogy ami levegőbe kerül, az végérvényesen eltűnik, megsemmisül. Az „*elpárolog*” átvitt értelmű jelentése (az angolban „*vanish into thin air*”) is származtatható abból a felfogásból, hogy ami légnemivé válik, az nincs többé. Hasonló jelentéstartalmat hordoz a „*koddé válík*” kifejezés. A „*fustbe megy*” (a franciában „*s'en aller en fumée*”) szókapcsolat jelentése is hordoz arra utalást, hogy az elégetett és légnemivé vált anyag megszűnik létezni. Nem hibáztatható tehát az emberiség, hogy az egyre kiterjedtebbé váló ipari tevékenysége során a levegőkörnyezet szempontjára és a levegőszennyezés lehetőségére *eleinte* nem is gondolt.

A levegőszennyezés kezdetei

Az emberiség számára a levegőszennyezés a tűzhasználatával egyidős. Az őskorban levegőszennyezésről legfeljebb a lakóhelyül használt barlangokban beszélhetünk. Régészeti feltárások bizonyítják, hogy az ott élő elődeink mai szemmel elképzelhetetlen mértékű levegőszennyezésnek lehettek kitéve. Az őskorban eleinte a városokban előforduló leggyakoribb levegőtminőségi probléma a szennyvízzel és hulladékkal együttjáró bűz volt. A római birodalom városaiban azonban már elterjedt a fatüzelés, olyannyira, hogy az időnként megülő szmogra külön kifejezést is használtak, „*niehét marvonzigák*” nevezték. A kezdetleges ipari technológiák, különösen a fémkohászat környezetükben olyan súlyos és veszélyes levegőszennyezést okoztak, melyek nyomai még grönlandi jégfúrásokban is kimutathatók.

Levegőszennyezés a középkorban

Londonban a kora középkorban a legnagyobb légszennyező források a fatüzelésű mészégető kemencék voltak, melyek nitrogén-oxidokat, szén-monoxidot, kormot és füstreszecskéket bocsátottak számottevő mennyiségben a levegőbe. A tűzifa hiánya miatt már az 1300-as évek kezdetén áttértek a kőszén használatára, ami sokkal súlyosabb levegőszennyezést okozott, hiszen az égéstermékek között megjelenik a kén-dioxid. A levegő minősége olyannyira elviselhetetlenné vált, hogy 1265-ben már külön testület foglalkozott a helyzet orvoslásával. 1306-ban I. Edward angol király rendeletben tiltotta meg a mészégető kemencékben a kőszén használatát. A tiltás azonban rövid életűnek bizonyult, a kőszén és a faszén hamarosan Anglia-szerte elterjedt. Már nemcsak mészégető kemencékben használták, hanem téglagyárakban, sörfőzdékben, üvegyártásnál, sőt a házak fűtésére is. A levegő mai szemmel nézve elképzelhetetlenül szennyezett volt, különösen az

őszi-téli hónapokban 1661-ben „Fumifugium, az elviselhetetlen levegő avagy a Londont betető füst”²⁰ címmel könyv jelent meg Londonban. John Evelyn angol író 1684-ben azt írta Naplójában: „A hideg miatt London levegőjében oly mértékben megreked a tengeri köd és szénfüst keveréke, hogy az utca másik oldalára alig lehet átlátni, az ember tüdejé pedig annyira feltelik ennek részecskéivel, hogy szinte fáj levegőt venni.”²¹ A kibíratatlan légszennyezés szinte mindent tönkretett, az épületektől kezdve a festményekeken át a növényekig és az ivóvizig.

Az ipari forradalom és a levegőszennyezés

Fentiek után nehéz elképzelni, de a gőzgép feltalálását és elterjedését követően a városok levegőtisztasága még tovább romlott. A mindössze 5 %-os hatásfokkal működő, széntüzelésű gőzgépek ontották magukból a füstöt, miközben a malmoktól kezdve a szivattyútelepeken át a mozdonyokig mindenütt használták őket. A gőzgépek az ipari forradalom (1750–1880) és vele együtt a tömegtermelés jelképévé váltak, de ezért súlyos árat kellett fizetni. A gőzgépek elterjedésének köszönhetően a szén felhasználása 1800 után egy évszázad alatt százszorosára növekedett világszerte. Noha széntüzelésű ipari üzemek a világ számos országában létesültek, a súlyos és tartós légszennyezés azonban még sokáig Anglia kiváltsága maradt.

²⁰ Fumifugium, or the Inconvenience of the Aer and the Smoak of London Disputed

²¹ „London by reason of the excessive coldness of the air, hindering the ascent of the smoke, was so filled with the fuliginous (sooty) steam of sea-coal, that hardly could one see across the street, and thus filling the lungs with its gross particles exceedingly obstructed the breast, so as one would scarce breathe (Diary, 1684)”

A kezdeti intézkedések és kudarcaik

Anglia városaiban az elviselhetetlenné váló levegőtisztaság miatt megszorodó panaszok orvoslására az 1840-es években több alkalommal is megkísérelték a széntuzelés korlátozására törvényeket alkotni, ezek azonban az ipar ellenállása miatt rendre megbuktak. Első alkalommal 1853-ban sikerült az angol parlamentnek törvényjavaslatot elfogadnia a „füst okozta kellemetlenségek mérséklésére”, de hatálybalépését hosszú évekig sikerült késleltetni. 1863-ban fogadták el a mosásodagyártó üzemek sósavgőz kibocsátását korlátozó ún. „Alkali törvényt”, majd ezt követően a levegőtisztaság javítása több elfogadott törvényjavaslatban is szerepelt.

A 19. században az Egyesült Államok bővülő ipari termelésének is elkerülhetetlen velejárója volt az esetenként rendkívüli mértékű levegőszennyezés. Angliához hasonlóan az első, széntuzelést korlátozó helyi rendeletek, például 1869-ben Pittsburgh-ben vagy 1881-ben Cincinnati-ban az ipari lobbis ellenállása miatt még kudarcra voltak ítélve. Annak ellenére, hogy orvosi tanulmányok bizonyították, hogy ezekben a városokban a három vezető halálok légzőrendszeri eredetű: a tuberkulózis, a tüdőgyulladás és a légschurut. St. Louis városa 1893-ban rendeletileg tiltotta be az ipari üzemeknek a „sűrű fekete vagy sötét füst” kibocsátását, és ennek ellenőrzésére hatóság felügyelőt nevezett ki. A legfelsőbb bíróság azonban 1897-ben hatályon kívül helyezte a rendeletet az azal az indoklással, hogy a város „túllépte a hatáskörét” és „teljességgel indokolatlan korlátozó rendeletet alkotott”. 1910-ben Boston városa volt az első, amelynek a szénfüst kibocsátás korlátozására hozott rendelete átment az igazságszolgáltatás rostáján.

Levegőtisztaság a 20. század első felében

A 20. század első évtizedeiben a városi levegőszennyezés átmeneti csökkenése azonban nem elsősorban a csak szórványosan létező városi rendeleteknek köszönhető. Sokkal nagyobb szerepe volt ebben az elektromosság és a villanymotorok elterjedésének, aminek révén a

szén égetése számos kisebb üzem helyett nagyobb erőművekben történt, kiszorítva a súlyos levegőtisztítást okozó gőzgépek tízezreit. A koncentrált, nagy tömegű szén égetése erőművekben, noha látszólag enyhített az elviselhetetlenné váló városi levegőtisztításban, egyáltalán nem bizonyult veszélytelennek. A légszennyezés szempontjából különösen kedvezőtlen meteorológiai helyzet, alacsony szintű stabil légrétegződés (ún. hőmérsékleti inverzió) esetén az ipari üzemek kéményeiből kiáramló és a felszín közelében megakadó szénfüst több országban is gyakorlatilag ipari katasztrófát okozott. Ez a légállapot nagyjából olyan hatású, mintha zárt térbe, mondjuk egy csarnokba történne a füstgáz kibocsátása. 1930 decemberében például Belgiumban a Meuse folyó völgyében egy 5 napig tartó sűrű, szénfüsttel telített köd 63 ember halálát okozta, és további 6 ezer embert betegített meg.

Az áttörés: Donora

De az első, jobban mondva a korabeli sajtó ingerkuszobét először elérő sokszínű szembeesés azzal, hogy amit a levegőbe bocsátunk, az nem oszlik szét a levegőben és rendkívül súlyos következményeket okozhat, nem Európában, hanem az Amerikai Egyesült Államokban történt, közvetlenül a második világháborút követően. A nekilóduló gazdasági növekedés ipari üzemek ezreit hívta életre a környezeti hatások, köztük a levegőtisztítás lehetőségeinek és lehetséges következményeinek totális figyelmen kívül hagyása mellett. A fejlett országokban mai szemmel elképzelhetetlenül hiányos munkavédelmi és biztonságtechnikai előírások mellett létesülő üzemeknél a kizárólagos szempontok az olcsó munkaerő, energia és nyersanyag, a vasút vagy vízi szállítás, illetve az ipari víz biztosításának lehetőségei voltak. Így történt ez a Pennsylvania állambeli Donora nevű kisvárosban is, ahol az US Steel & Wire Co. acélipari konszern acélgyárat és cinkkohászati üzemét létesített még a 20. század első évtizedeiben. Az üzemeket a város közvetlen szomszédságában, a Monongahela folyó partján építették fel, azok 10–15 méter magasba nyúló kéményei minden tisztítás

Füstbe ment bolygó

nélkül okádták a füstöt (2. ábra). A kisváros lakóinak több mint kétharmada az acéltipari konszern üremeiben dolgozott, nem is akármilyen körülmények között: a cinkkohászati üzemben a munkások fél műszakonként váltották egymást, de a teljes műszakra eső bért megkapták, olyannyira elviselhetetlenek voltak a munkakörülményeik.



2. ábra

Ipari negyed a Permsziharsa állambeli Donorában 1948-ban (1).

A donorai ipari katasztrófa meteorológiai körülményei

1948. október 27-én egy sajátos meteorológiai helyzet, ún. *hőmérsékleti inverzió* alakult ki a Monongahela folyó völgyében. Ilyenkor a melegebb levegő a felszín közelében megrekedt hideg levegő fölé rétegződik, megakadályozza annak felszállását, az ún. *konvekciót*. Ezáltal a felszín közelében a levegőbe bocsátott szennyezőanyagok csak

kis magasságig keveredhetnek el a légkörben: ilyenkor a helyzet hasonló ahhoz, mintha néhányszor tíz méteres magasságban sátrötöt feszítenénk ki a földfelszín felett. A jelenség völgyekben, dombos vidékeken meglehetősen gyakori (napsütéses napokon különösen, nyáron is), de rendszerint rövid ideig, néhány óráig tart. Telen azonban, amikor a felszín közelében megkezdett hideg levegőben sűrű köd kepződik, a napsugárzás energiája nem elegendő a felszín felmelegítéséhez és a feláramlás biztosításához: ilyenkor a hőmérsékleti inverzió napokig is fennmaradhat.



3. ábra

Donora füstcája 1948. október 29-án, délben, fényes nappal.

Az ipari katasztrófa

Ez történt Donorában is: a kialakult inverziós rétegben megkezdett az üzemek által kibocsátott füst. A füstből rendkívül sűrű (a levegő minden egyes kobcentiméterében több ezer, 1–2 mikrométeres cseppből álló)

füstköd keletkezett, ami lényegében „fixálta” a hőmérsékleti inverziót. A kisvárosra nappal is éjszakai sötétség borult (3 ábra), a látótávolság néhány méterre csökkent, közlekedni, a várost elhagyni gyakorlatilag nem lehetett. Az üzemek tovább működtek, változatlan intenzitással okádták tovább a füstöt, és a helyzet hamarosan drámaivá vált. A kisváros lakói eleinte fejfájásra, szédülésre, állandó köhögési ingere panaszkodtak, majd hamarosan sokuknak súlyos légzési nehézségek támadtak. A város egyetlen kórháza órák alatt megtelt. Ezután a városházán alakították ki szükségkórházakat, ahol a tüdőtök légzőkészülékeikkel a betegeket és a halálközeli állapotúakat felváltva lelegeztették. A városháza alagsorát halottasháznak rendezték be, mert a halottak száma egyre nőtt. A kisváros 14 ezer lakosának egyharmada, mások szerint fele megbetegedett, több százan szorultak kórházi ellátásra. Jellemző a korabeli érzéketlenségre és mentalitásra, hogy az üzemek leállítását tulajdonosaik a helyzet ismeretében, a város elöljáróinak kifejezett kérése ellenére megtagadták. Végül október 31-én a délelőtti órákban mégis a leállítás mellett döntöttek, ekkorra azonban egy kiadós eső véget vetett az öt napig tartó példátlanul súlyos mértékű levegőszennyezésnek.

A donorai katasztrófa kémiai tényezői

A rendelkezésre álló hiányos adatokból, illetve mai ismereteink alapján rekonstruálhatjuk, mi is történhetett valójában 1948. októberének utolsó napjaiban Donorában. Az üzemek és a lakóházak kéményein keresztül a kén-tartalmú bauxit égetésekor kén-dioxid, szén-monoxid, nitrogén-dioxid, korom, penye, a cinikkohászatból cink-oxid tartalmú részecskék és hidrogén-fluorid kerültek jelentős mennyiségben a levegőbe. Ezek a gázok és részecskék a füstködben feldúsultak és az inverzió miatt rendkívül nagy koncentrációt értek el. A becslések szerint a kén-dioxid koncentrációja a füstködben 1500 és 5500 mikrogramm/köbméter között lehetett (a kén-dioxidra vonatkozó mai egészségügyi határérték²² 125 mikrogramm/köbméter). A

²² 24 órás határérték.

füstköd rendkívül apró cseppjei hatékonyan magukba gyűjtötték a levegőtisztító anyagok többségét.²³ A kódcseppekbe oldódó kén-dioxidból előbb kénessav, majd kénsav keletkezett, ami a hidrogén-fluoriddal²⁴ együtt erősen savas kémhatásúvá tette a kódcseppeket. Az apró savas kódcseppek méretükkel fogva belégzéskor az alsó légutakba, sőt a tudó léghólyagocskához is lejuthatnak, irritálják és rontcsolják a szöveteket. Ennek következtében a légzés hatékonysága romlik, a beteg pedig egyre súlyosabb légzési nehézségekkel küzd, később légzéstimogatóra szorul, majd egy kritikus szint alatt megfullad. Hogy Donorában valami hasonló történhetett, arra abból következtethetünk, hogy az elhunytak boncolásakor a vérben a normál érték 12–25-szörösének megfelelő koncentrációban találtak fluoridot.

A donorai katasztrófa mérlege

Az öt nap mérlege 20 halott, több száz súlyos állapotú beteg, akik közül a rákövetkező egy hónapban további 50 fő hunyt el. A halálozási statisztikák szerint Donorában még további tíz évig a halálozások aránya jelentősen meghaladta a katasztrófa előtti időszakra jellemző mértéket. A felelőség megállapításával kapcsolatos későbbi történések több mint tanulságosak: noha a cikkkohászati üzem fél kilométeres körzetében a növényzet teljesen kipusztult, az üzemek tulajdonosi felelősségüket mégsem ismerték el. Cinikus módon a hatóságok is elháríthatatlannak, „Isten akaratából bekövetkezőnek”²⁵ minősítették a katasztrófát hivatalos vizsgálati jelentésükben. A hatóság által elvégzett helyszíni mérések jegyzőkönyveinek, az általuk összegyűjtött méréseknek nyoma veszett. A magát becsapótnak érző lakosság által indított

²³ A füstköd egy köbméterében mindössze kb. 0,3 milliliter folyékony víz van jelen rendkívül finom elosztású cseppek formájában, e cseppek összességének a felülete viszont 1m². E nagy felületen keresztül a vízben jól oldódó gázok vagy apró részecskék rövid idő alatt a cseppekbe kerülnek.

²⁴ Az üveget is megmaró fluorosav.

²⁵ „Act of God”.

kártérítési perekben mindösszesen alig 236 ezer dollár kártérítési összeget ítéltek meg a bíróságok. A perekben rendelkezésre álló tényadatok kizárólag a boncolási jegyzőkönyvek megállapításaiból származtak. Korabeli orvosszakértők jelentéseiből arra következtethetünk, hogy ha a példátlan füstköd akár csak egy-két nappal tovább tartott volna, akkor több százra rúgta a halottak száma.

A donorai katasztrófa utóélete

Donora példája azonban így sem múlt el nyomtalanul. Noha a korabeli sajtó azonnal meg nem tudott mit kezdeni az eseményekkel, 1950-ben a *The New Yorker* című napilapban a „The fog (A kód)” címmel egy írás jelent meg Berton Roueché tollából, ami átterest hozott a levegőszennyezési problémák kezelésében. 1955-ben az amerikai törvényhozás megszavazta az első levegőtisztaság-védelmi törvényt (U.S. Air Pollution Control Act), a világon az első, a levegőtisztaság védelmét célzó jogszabályt. Arra azonban további 15 évet kellett várni, hogy megszülessen az első, a légszennyező anyagok kibocsátására határértékeket szabó szövetségi törvény (Clean Air Act, 1970). 2002-ben a donorai események krónikája könyvben is megjelent, „*When smoke ran like water*”³⁶ címmel. Donorában pedig 2008-ban, a katasztrófa hatvanadik évfordulóján megnyitották a szmog³⁷ múzeumot, amely a korabeli eseményeket, azok okait és következményeit mutatja be.

A Nagy Londoni Szmog

1952. december 5-e és 8-a között még Angliában is szokatlan, látáhatatlanul sűrű kód lepté el Londont. A helyiek által sűrűsége és

³⁶ Amikor úgy áradt a füst, akár a víz.

³⁷ Szmog, smog angol kifejezés a szennyezett füstködre a smoke (füst) és a fog (kód) szavakból, 1905-ben alkotta Harold Des Voeux, az angliai Szentfüst Ellenőrzési Társaság kincstárnoka.

szaga miatt csak „báblevesnek” nevezett szennyezett ködben a látótávolság 1–2 méterre csökkent, a tömegközlekedés leállt, még a mentők sem tudtak közlekedni. A lakosság mégsem esett pánikba, annyira hozzá volt szokva a hasonló helyzetekhez. A sűrű szmogot egy dél-angliai középponti stabilis időjárási képződmény, ún. anticiklon hatására beálló hőmérsékleti inverzió okozta, a szél szinte teljes hiányában a kibocsátott szennyezőanyagok 100–200 m magasság alatt rekedtek. A szmog négy napja alatt 4000 tonna füst árasztotta el London levegőjét, ezen kívül 3000 tonna kén-sav²⁸, 600 tonna szén-sav és 80 tonna fluorid került a levegőbe. A füstreszecskek koncentrációja köbméterenként 4,5 milligramm, a kén-dioxidé 3,8 milligramm értékre emelkedett. A részecskekonzentráció 90-szerese, a kén-dioxidé 30-szorosa volt a napjainkban érvényes egészségügyi határértéknek! A szmog kialakulásáért Donrától eltérően nem lehetett csak az ipart hibáztatni, mert 700 ezer háztartás rossz minőségű barnaszén elégetésével folyamatosan ontotta a szénfüstöt. 1952-ben Londonban a szén aránya 61% volt az összes energiafelhasználáson belül.

A Nagy Londoni szmog következményei

Donrához képest az is különbség volt, hogy a londoni szmognak nem voltak *azonnal látható* áldozatai. Egészen pontosan csak 12 fiatal szarvasmarha pusztult el váratlanul egy legelőn. Hetekkel később, a halottkémek, anyakönyvvezetők és a kórházak jelentéseinek statisztikai összesítéséből derült csak ki, hogy a szmog négy nap alatt 4000 áldozatot szedett²⁹. A halottak között a 65 éven felüliek és a krónikus betegségekben szenvedők voltak többségben. A vezető halálokok a légszűrés és a tüdőgégés voltak. A szmog alkotói közül a kőszén elégetéséből származó kátrányreszecskek és a kénvegyületek voltak a

²⁸ Kén-dioxid formájában.

²⁹ Az időszakra eső átlagos halálozáson felül.

Füstbe ment bolygó

legveszélyesebbek. A következő év márciusáig még a szmog hatására visszavezethetően további 13 ezer emberrel végzett tüdőgyulladás.

A London-típusú szmog eltűnése

Az 1956-ban hatályba léptetett levegőtisztasági törvény (Clean Air Act) a lakossági fűtésre is kiterjedt, korlátozta a gyenge minőségű szén felhasználását, előírta az ipari üzemek minimális kéménymagasságát és füstmentes vezeteket hozott létre Londonon belül. Ennek ellenére a szmognak még hosszú évekig akadtak áldozatai. A legtöbb 1962-ben, amikor 750 többlet halálesetet írtak a szmog számlájára. 1967-ben megkezdődött a földgázüzelésre való átállás. Az energiafelhasználás szerkezetének átalakításának, a technológiai fejlesztéseknek és a hatékony szabályozásnak köszönhetően a kén-dioxid koncentrációja már 1980-ra a mai egészségügyi határérték (50 mikrogramm/köbméter) alá csökkent. Ennek alapján kijelenthetjük, hogy a London-típusú szmog korszaki formájában ma már csak rossz történelmi emlék, legalábbis Európában és Észak-Amerikában.

A Nagy Londoni Szmog tanulságai

A történelmi előzmények fényében több mint meglepő, hogy Londonban a 20. század közepéig kellett várni arra, hogy számos, együttesen több tízezer áldozatot követelő súlyos légszennyezési helyzet után az angol parlament végre megalkossa Európában az első levegőtisztaság-védelmi törvényt. Nehéz elvonatkoztatni attól a gondolattól, hogy a termelés növelésének, az ehhez szükséges energia biztosításának, és végső soron a profit maximalizálásának mindenek felett álló érdeke hogyan akadályozta meg közel három évszázadig, hogy a levegőkörnyezet, itt inkább az emberek egészségének védelme egyáltalán figyelembe veendő szempont legyen. Nem véletlenül mondják,

hogy a történelem az élet tanítómestere, de egyben a legrosszabb is, mert senki sem tarai belőle

Modern városi levegőszennyezés

Természetesen a téli időszakban gyakori kedvezőtlen időjárási helyzetekben napjainkban is előfordul az egészségügyi határértéket meghaladó mértékű levegőszennyezés, amelyet ma is szmognak nevezünk. Kémiai összetevői, koncentrációja és hatása szempontjából azonban ez a szmog már nem tekinthető London-típusú szmognak, noha ez is zömében elsődleges (közvetlen kibocsátásból származó) levegőszennyezés. Fő forrásai a közlekedés és az ipari üzemek valamint egyre növekvő arányban a háztartási fatüzelés kibocsátása, a közlekedés által felvert és az építkezésekről származó por. Kiemelten veszélyes összetevői közül a szén-monoxid, nitrogén-dioxid, szulfidok, salétromsav, formaldehid, korom nanorészecskék³⁰, az égésből származó rákkeltő szerves vegyületek, a gépjárművek katalizátoraiból származó nanoméretű fémrészecskék, a fékbruték, illetve a gumiabroncsok kopásából származó részecskék, valamint a baktériumok és vírusok érdemelnek említést. Tekintve, hogy egy felnőtt ember naponta átlagosan 30 kg levegőt lélegz be, egyáltalán nem közbűs, hogy milyen koncentrációban vannak jelen a városi levegőben az egészségre káros anyagok. Fő hatásuk a légzőrendszer betegségei, valamint szív- és érrendszeri megbetegedések gyakoriságának növekedése. Gyermekkorban a tartós levegőszennyezés csökkenti a tüdőkapacitást és jelentősen megnöveli a hörghurut és az asztma kialakulásának esélyét. A szennyezett nagyvárosi levegő hosszabb távon – a dohányzáshoz hasonlóan – növeli bizonyos rákbetegségek kialakulásának valószínűségét, rendszerint nagy arányban okoz krónikus légúti gyulladást, ami igen gyakran a légzőszervek szöveteinek elhalását eredményezi.

³⁰ A tüdő légbolyagjába, sőt közvetlenül akár a véráramba is bejutó, néhány nanométer (a méter egymilliárdod része) átmérőjű apró részecskék.

A London-típusú szmog reneszánsza – Kína

Míg a fejlett országokban az extrém levegőszennyezés alkalmi jelenséggé vált, addig a fejlődő országokban, elsősorban Kínában reneszánszát éli. A kínai városok közel felében a szálló por²¹ koncentrációja az év 150 (1) napján meghaladja a tisztítási küszöbértéket (100 mikrogramm/köbméter). Legmagasabb mért értéke 350 mikrogramm/köbméter volt. A fő források a széntüzeleai erőművek, a járművek, a háztartási széntüzelés, az építkezések és a porviharok. Kínában az ezredfordulón még csak évente 1,3 milliárd tonna kőszénét használtak fel, 2006-ban már ennek közel a kétszeresét. Mivel a füstgáz kentelemitése négyszer annyiba kerül, mint a porleválasztás, 2006-ig csak az erőművek töredékét (15 %-át) látták el kentelemitő berendezéssel. 2006 óta a helyzet némileg javult, az új erőművek egyre növekvő hányadát látják el a kén-dioxid kibocsátást csökkentő füstgázmosó berendezéssel. A forgalomba helyezett járművek száma Kínában 1990 és 2006 között évente 20 %-kal (1) növekedett. De még az így generált extrém levegőszennyezés sem érhet a klasszikus londoni szmog nyomába: a szálló por koncentrációja legfeljebb egytizede, a kén-dioxid koncentráció 1/30-a, a koronkoncentráció egynegyede a nagy londoni szmogban mért értékeknek.

²¹ Helyesen aeroszol részecskék.

III. FEJEZET

REGIONÁLIS LEVEGŐSZENNYEZÉS

3.1. fejezet A savas eső

Savas eső – savas ülepedés

A természetben az esővíz savasságát a légtorból beoldódó széndioxidból képződő szénsav határozza meg. A tiszta esővíz tehát nem semleges, hanem kissé savas, pH értéke 5,5 körüli.²² Savas esőről mint levegőszennyezésről akkor beszélhetünk, ha az esővíz savassága jelentősen nagyobb a természetesnél. 4-es pH esetében a savasság a természetesnek 40-szerese, 2-es pH esetében már 4000-szerese! A savas esővíz jellemző pH értéke 4 alatti, a szennyezett levegőben a kődvízé 2,2 és 4 közötti. A „savas eső” kifejezés először 1872-ben jelent meg egy skót kémikus (Angus Smith) könyvében. A savasság a felszínre azonban nemcsak eső révén kerülhet, hanem a kőcseppek, savas részecskék és savgőzök vagy gázok ülepedésével is. Sőt gyakran előfordul, hogy utóbbiak révén jóval nagyobb a felszínre hulló savasság mértéke, mint ami az esővel érkezik. A „savas eső” kifejezés tehát

²² Kosmetikumokon a természetes állapotra utaló gyakori jelölés a „pH 5.5”.

pontatlan, a valóságban inkább „savas ülepedés”-ről kellene beszelnünk. A savas eső néven ismertté vált jelenség egyike a légtérrel kapcsolatos regionális környezeti problémáknak. Előfordulása a felszínre ülepedő maró hatású, ún. ásványi savakhoz, a kénsavhoz, a salétromsavhoz és régebben a sósavhoz kötődik. De hogyan kerülnek ilyen veszélyes anyagok a légkörbe, különösen olyan nagy mennyiségben, hogy a szárazföldön szinte mindenhol súlyos károkat okozzanak?

A savasság mint helyi levegőszennyezés

Történelmileg a kőszen égetése a savasságot okozó anyagok legnagyobb forrása. A szén égetésekor annak kén tartalmából kén-dioxid gáz keletkezik, kisebb mennyiségben pedig sósavgőz. A kőszenet tüzelőanyagként az 1200-as évek óta használták Angliában, kezdetben mészégetéshez és kovácsműhelyekben, később irveg- és téglagyárakban, a házak fűtésére és az ipari forradalom után gőzgépek meghajtására is. A 18. század végén kidolgozták a mosószóda gyártásának technológiáját, ami mindhárom maró sav jelentős légköri forrásának bizonyult. A felszabaduló savak jelentős környezeti károkat okoztak Anglia és Franciaország-szerte. A probléma annyira súlyossá vált, hogy 1863-ban Angliában ún. Alkáli törvényt kellett alkotni a mosószódagyártás sósavkibocsátásának korlátozására. A törvény hatására kifejlesztett füstgázmosó berendezés alkalmazása révén a mosószódagyárak sósav kibocsátása 95%-kal mérséklődött. Az 1880-as évekre szerencsére a mosószódagyártás környezetszennyező technológiája megszűnt. A kénsav, salétromsav kibocsátása azonban nem szűnt meg, és mivel más üzemekre a törvény nem vonatkozott, a légszennyezés egyre súlyosabb mértéket öltött. A légköri savasság ekkor még együtt járt az elsődleges levegőszennyezéssel (a London-típusú szmoggal), annak legveszélyesebb és legnagyobb környezeti kárt okozó összetevőjének számított (lásd 2. fejezet).

Csőbőrből vödörbe: London-típusú szmogból savas eső

A kőszen égetésekor és az ércperitokles során keletkező kén-dioxid onmagában is savas jellegű gáz. A felhő- és ködsepekben jól oldódik, az oldódás során belőle közepesen erős kénsav keletkezik. Vízben jól oldódó gázként a felszínen mindenhol megtalálható nedvesség is vonzza, ezáltal közvetlenül távozik a légkörből. Ha a kibocsátás alacsony kéménnyekből történik olyan környezetben, ahol a ködképződés gyakori, akkor súlyos helyi levegőtisztaságromlás, ún. London-típusú szmogot okozhat. Amikor azonban éppen a London-típusú szmog megszüntetése érdekében Angliában az erőműveknél és ipari üzemeknél magas kémények építését írták elő, akkor a helyi levegőtisztaságromlás jelentősen mérséklődött. A nagyobb magasságban kibocsátott kén-dioxid már csak ritkán keveredett a kibocsátás helyén a felszín közelébe, viszont a szél segítségével több száz, sőt ezer kilométer távolságra is eljutott. Ezzel azonban a levegőtisztaságromlás nem szűnt meg, csak átalakult: helyi szennyezésből regionális, sőt kontinentális léptékű légszennyezéssé nőtte ki magát. Ez történt az 1960-as évektől az észak-amerikai kontinens középső és keleti felén, Európa nagy részén és Kelet-Ázsiában is.

A savas eső kialakulása

A kémények magasságának növelése a kén-dioxid tulajdonságait nem változtatta meg. A vízben jól oldódó gáz nagy magasságokban bőven talált felhősepeket az oldódásra, az intenzív napsugárzás odafent pedig kedvezett a gyors kémiai átalakulásnak: a kevésbé veszélyes kén-dioxidból 20 perc alatt erősen maró hatású kénsav keletkezett. A kén-dioxid átalakulása kénsavgőzzé víz nélkül is végbemegy, csak viszonylag lassan. A savassá vált felhősepek pedig, amikor elég nagyra nőttek ahhoz, hogy kihulljanak, savas eső formájában hullottak a felszínre, többnyire jóval messzebb attól a helytől, ahonnan származtak. A felhőkbe burkolózó magasabb hegyek eső nélkül is közvetlenül részeselehettek a savasságból. A kén-dioxid mellett a savasság másik hordozói a

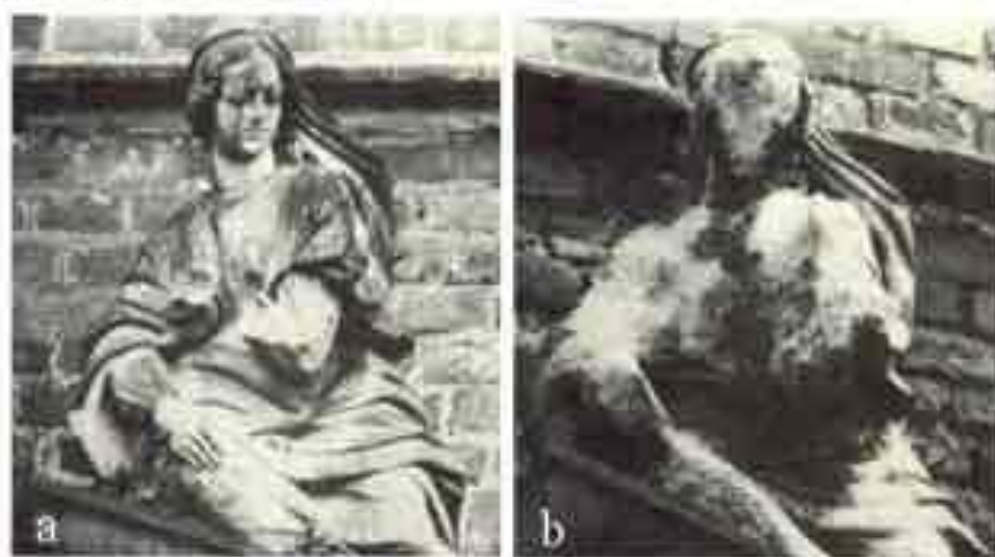
nitrogén-oxidok. Ezek a gázok is erőművek és gépjárművek kibocsátásából származnak. A nitrogén-oxidokból nem felhővizben, hanem a levegőben napsugárzás hatására képződik salétromsavgőz (részletesebben lásd a 3.2. fejezetben). A salétromsav vízben igen jól oldódik, így ha a feltételek adottak, könnyen köd- vagy felhőcseppelbe kerül. A salétromsavgőz azonban közvetlenül is megtámadhatja a karbonátos talajokat, amelyekkel kémiai reakcióba lép, épületeket, vagy a növények leveleit. Ezt a folyamatot száraz ülepedésnek nevezzük.

A légköri savasság hatása az élővizekre

Az iparvidékek elhelyezkedése és az uralkodó légköri áramlási viszonyok miatt a savas eső hatását leginkább megszenvedő régiók Kanada keleti tartományai, az USA északkeleti államai, Skandinávia déli része, Közép- és Kelet-Európa, Oroszország, Kína, Korea, Japán, India és Thaiföld voltak. A savasság csökkentette a felszíni vizek, a tavak és folyók pH-ját. Mivel a vízben élő élőlények, a rovarok, algák és plankton többnyire csak 5-es pH felett életképesek, ezért a pH csökkenése a pusztulásukat okozza. A tavak élővilágának kipusztulása a legszembetűnőbben Skandináviában jelentkezett az 1960-as években. A tavak természetes pH értéke egy-két évtized alatt 1 egységet csökkent, azaz benne a savasság a tízszeresére nőtt. Az 1970-es évek végére Svédország 90 ezer tava közül 25 ezerben csak nyomokban maradt élet. A savasság hatása a legnagyobb mértékben az első tavaszi hóolvadáskor érvényesül. A hóban ugyanis a tél folyamán felhalmozódnak a savak, amelyek gyors olvadáskor egyszerre jutnak az élővizekbe. Előfordul, hogy az olvadásvíz tízszer savasabb, mint az esővíz.

A légköri savasság hatása a növényekre és az épített környezetre

A savak a növények levelzetét és gyökérzetét is károsítják. A levelek felületére jutó sav kikezdi a védő viaszréteget, és sebezhetővé teszi azt a kiszáradással vagy a fertőzésekkel szemben. A talajban a gyökérzet elől illetve a levelekből is a savak kioldják a növények számára fontos ásványi elemeket, illetve oldhatóvá tesznek a növények számára mérgező elemeket, például az alumíniumot. Az erdőpusztulás Lengyelország és Csehország egyes vidékein az 1990-es évek elejére a 60–80%-os mértéket is elérte. Természetesen az erdőpusztuláshoz más légszennyező anyagok jelenléte is hozzájárul, az ózon káros hatása közismert, de a levelek felületére ülepedő korróziószecskék is nehezítik a növények légzését. A savas ülepedés a növényzet mellett az épített környezetet is kikezdi. Különösen a mészkőből, homokkőből és márványból készült épületek és műalkotások (4. ábra) vannak veszélyben, de a savak a rézből és bronzból készült műtárgyakat sem kímélik.



4. ábra

Stobor a Harten kastély épületénél, Páhr-vidék (készült 1702-ben).
Fénykép 1908-ból (a) és 1969-ből (b).

A savas eső problémájának enyhülése

Az 1970-es évekre felismerték, hogy a légkori savasság hatásai nem ismernek országhatárokat. 1979-ben Genfben 34 ország és az Európai Közösség megállapodást írt alá a határokon átívelő légszennyezés korlátozásáról. 1985-ben ezt a megállapodást a kén-tartalmú gázok kibocsátásának korlátozására vonatkozó egyezményvel egészítették ki, amely 1993-ra az 1980-as emisszió 30 %-os csökkentését írta elő. Ez a csökkentés kevésnek bizonyult a kelet-európai erdőpusztulás megállítására, ezért 1994-ben 60 %-os csökkenést irányoztak elő 2010-re. 1999-ben a légkori savasságot, az eutrofizációt és a felszínközeli ózon koncentrációját egyidejűleg korlátozó megállapodással egészítették ki az egyezményt. Megállapították, hogy a természetes vizek évente hektáronként legfeljebb 9–14 kg kén ülepedését tudják elviselni károsodás nélkül, miközben az 1990-es években még 20–50 kg volt az ülepedés mértéke. Európában a kén-dioxid és nitrogén-oxid kibocsátásban jelentős csökkenést sikerült elérni, és ugyan lassabb ütemben, de további kibocsátás mérséklődés várható e század első évtizedeiben. Napjainkban már csak Délkelet-Európa bizonyos területein haladja meg a kén éves ülepedésének mértéke a hektáronkénti 10 kg-ot, a korábban a legnagyobb terhelésnek kitett közép-európai területeken (az ún. „Fekete Háromszög”, Németország, Lengyelország, Csehország) is a célérték alá csökkent. Délkelet-Kínában ezzel szemben ma is hatalmas területeken 60 kg feletti éves kén ülepedést mérnek, így a savas ülepedés elsőként Európában felismert drámai környezeti hatásai napjainkban már csak ebben az országban jelentkeznek.

3.2. fejezet A fotokémiai (Los Angeles típusú) szmog

Láthatatlan légszennyező források: másodlagos levegőtisztaság

A levegőtisztaságról általában mindenkinek füstölő kémények, füstöt okádó járművek vagy erdőtüzek jutnak az eszébe, amelyek nagyon is látható levegőtisztaságot okoznak. Az kevésbé ismert, hogy bizonyos körülmények között maga a légtér is képes arra, hogy szabad szemmel nem is látható légszennyező anyagok közreműködésével a növények által kibocsátott ártalmatlan vegyületekből is súlyosan egészségkárosító és szabad szemmel is jól látható levegőtisztaságot, ún. fotokémiai szmogot (ismertebb nevén Los Angeles típusú szmogot) hozzon létre. Ennek az ún. *másodlagos levegőtisztaságnak* a tulajdonságai lényegesen különböznek a közvetlen kibocsátó forrásokból származó elsődleges levegőtisztaságtól: rendszerint jóval nagyobb területre terjed ki, sokszor tisztának tűnő vidéki területek fölött is kialakul, forrásai nem ismerhetők fel és sokkal nehezebb a mérséklésére hatékony intézkedéseket hozni.

A fotokémiai szmog kialakulásának feltételei

A fotokémiai szmog kialakulásához mindenekelőtt kedvező időjárási feltételek szükségesek. Legfontosabb az erős napfény, ami a szmog kialakulásához szükséges energiát szolgáltatja, és a gyenge légmozgás, amely gátolja a kibocsátott légszennyező anyagok elszállítását és felhígulását. Tavasztól őszi frontmentes időben vagy vastag, több száz kilométer kiterjedésű felhőzet esetén kedvezőek az időjárási feltételek a fotokémiai szmog kialakulásához. Elősegíti a szmog képződését, ha a légtérben a függőleges irányú átkeveredés gátolt, vagyis hőmérsékleti inverzió alakul ki. Los Angelesben földrajzi fekvésénél fogva ezek a feltételek az év 300 napján teljesülnek, így nem véletlen,

hogy ebben a nagyvárosban okozott elsőként súlyos problémát ez a jelenség a második világháborút követő években. A nagyváros amúgy is kedvező terep a levegőszennyezés kialakulása szempontjából, a magas épületek között a levegő áramlása, a légszennyező anyagok kicsereplődése gátolt, és az épületekkel zsúfolt városrészekben kevésbé melegszik fel a levegő, ami kedvez a hőmérsékleti inverzió kialakulásának. Fontos, hogy ezek a feltételek egymást követő több napon át fennálljanak, a fotokémiai szmog kialakulásához ugyanis – szemben a klasszikus légszennyezéssel, ahol a hatás a kibocsátást követően azonnal jelentkezik – hosszabb időre van szükség.

A természet „levégőszennyezése”

Nem is gondolunk bele, de a Földön az élet minden megnyilvánulása, beleértve az ember tevékenységét is, különböző anyagok légtérbe kibocsátásával jár. Ennek legnagyobb részét természetesen a légzés és a bomlás, illetve az égés révén felszabaduló szén-dioxid teszi ki, de a szén-dioxidon kívül számos más kémiai anyag is a levegőbe kerül. A növények például a kártevők elleni védekezésül különböző szénhidrogéneket bocsátanak a levegőbe, ezek egy részét még a szaglásunkkal is érzékelni tudjuk. A tűlevelű erdők vagy például a citrusfélék jellegzetes illatát a kozmetikai iparban is felhasznált vegyületek, a monoterpének adják. A lombos erdők a Földön évente 500 millió tonna izopren nevű szénhidrogént bocsátanak ki, de más szénhidrogénekből, például monoterpénekből is évente több mint 100 millió tonna a növények által kibocsátott mennyiség. A fűfélék a földgázban is előforduló etánt és propánt juttatnak a légkörbe, a természetek és a talajban élő baktériumok metánt.

Az emberi tevékenységből származó levegőszennyezés

Nagyvárosokban, ipar és közlekedés által érintett, sűrűn lakott területeken az emberi tevékenység hatása jelentősebb, annak ellenére, hogy a globális kibocsátásuk nagyságrendje eltorzul a természetes forrásoké mellett. A járművek jelentős mennyiségű nitrogén-oxidot, a tökéletlen égés melléktermékeként az el nem égett üzemanyagból és a kénből származó szénhidrogéneket, szén-monoxidot és koromrészecskéket bocsátanak a levegőbe. Az erőművekből is nitrogén-monoxid, kén-dioxid, szén-monoxid, korom- és penyerészecskék kerülnek a levegőbe. Az üzemanyaggyártás és szállítás során illékony szénhidrogének, az ipari tevékenység során oldószerek és más illékony vegyületek szabadulnak fel. De mindennapi életünk során is állandóan terheljük a légkört: elegendő csak a kozmetikumok vagy tisztítószer használata, a sütés-főzés, a dohányzás vagy az étkezés gondolni. Bár az egyes emberek kibocsátása jelentéktelennek tűnhet, sok millió ember kibocsátása már nem az: például a 20 millió lakosú Los Angelesben egy év alatt dohányfüsttel 300, a sütés-főzés révén 4000 tonna részecske kerül a levegőbe.

A légkör öntisztulási folyamatai

De mi történik azzal a hatalmas mennyiségű kémiai anyaggal, amely folyamatosan a légkörbe kerül? Szerencsére a földi légkörben működnek olyan fizikai és kémiai folyamatok, amelyek megakadályozzák, hogy ezek az anyagok túlságosan hosszú ideig a levegőben maradjanak és ott felgyűljenek. Ha ezek nem működnének, akkor például az emberiség által évente a légkörbe bocsátott 2 milliárd tonna szén-monoxid miatt a városi levegő szén-monoxid koncentrációja akár 0,1 % is lehetne, ami azonnali halált okozna! De vajon milyen folyamatok azok, amelyek ezt megakadályozzák? Talán a légköri oxigén alakítja át a különböző kémiai anyagokat ártalmatlan anyagokká, például a szén-dioxiddá és vízzé? Az oxigén, bármennyire is reakcióképes gázként ismert, a légkörben nem az kémiai tulajdonságai miatt

ahhoz, hogy reakcióba lépjen a legtöbb kémiai anyaggal, aktíválnak kell. Például a földgázt meg kell gyújtanunk ahhoz, hogy levegő jelenlétében elégjen, anélkül nem menne végbe a reakció. Az égés beindításához szükséges magas hőmérséklet azonban a légkörben a vilámlásokat leszámítva nincs.

A légkör „utcaseprője”, a hidroxilgyök

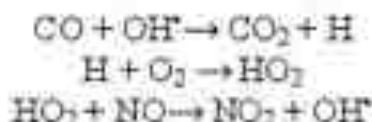
A talajközeli levegőben a nagy energiájú atomos oxigén keletkezéséhez közvetlenül a Nap sugárzása nyújt segítséget néhány kémiai anyag közreműködésével. A legfontosabb szereplő az ózon (O_3), amely rövidebb hullámhosszúságú ultraibolya sugárzás (az ún. UV-B sugárzás) hatására felbomlik molekuláris oxigénné (O_2) és nagy energiátartalmú (ún. gerjesztett állapotú) atomos oxigénné (O^*).



A keletkező gerjesztett állapotú atomos oxigén annyira nagy energiájú és reakcióképes, hogy még a vízgőzzel is képes reakcióba lépni, és a folyamatban ugyancsak rendkívül reakcióképes hidroxilgyök (OH^*) keletkezik:



A hidroxilgyököt a légkör utcaseprőjének is nevezik, hiszen fontos szerepet játszik a légkör tisztulásában. Ha nem képződne, a felszín közelében a levegő összetétele alkalmatlan lenne a ma ismert élet számára. Az oxigén önmagában a felszín közelében nem lenne képes a levegőbe kerülő kémiai anyagok átalakítására. A hidroxilgyök reakcióképességére jellemző, hogy a légkörben a legtöbb anyagot képes oxidálni normál hőmérsékleten. A szén-monoxidot például szén-dioxiddá alakítja, miközben a folyamat végén a hidroxilgyök újraképződik:

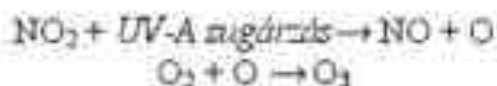


Láncreakciók a légkörben

A metánnal és más szénhidrogénekkal való reakcióiban nemcsak hogy újraképződik a hidroxilgyök, hanem még további hidroxilgyökök is létrejönnek. Ez a folyamat az ún. *láncreakció*, amelyben a szénhidrogénekhez képest milliószor kisebb koncentrációban jelenlevő hidroxilgyök rövid idő (vegyulettől függően néhány perc és néhány nap között) oxidálja a szénhidrogéneket. A szén-monoxid ártalmatlansághoz 2 hónapra, a metán esetében 9 évre van szüksége. Az oxidáció során a szénhidrogénekből vízben oldódó vegyületek, aldehidék (a metánból például formaldehid) és savak keletkeznek. A vízben oldódó anyagok a víz körforgásába kapcsolódva könnyen kikerülhetnek a légkörből: felhő- vagy ködcspepekbe oldódva vagy a csapadékba kerülve távozhatnak onnan. Ha nincsenek felhő- vagy ködcspepek a légkörben, akkor a keletkező vegyületek egy része megkötődhet az aeroszol részecskék felületén, és azokkal együtt távozhat a légkörből. A víz nedvesség formájában nemcsak a légkörben, hanem a talajban és a növényekben is megtalálható, amibe a vízben oldódó légköri vegyületek közvetlenül is beoldódhatnak. Ez a folyamat az ún. *száraz ülepedés*, elnevezésével ellentétben gyakran a nedvesség közvetítésével zajlik.

A nitrogén-oxidok szerepe a hidroxilgyökök képződésében

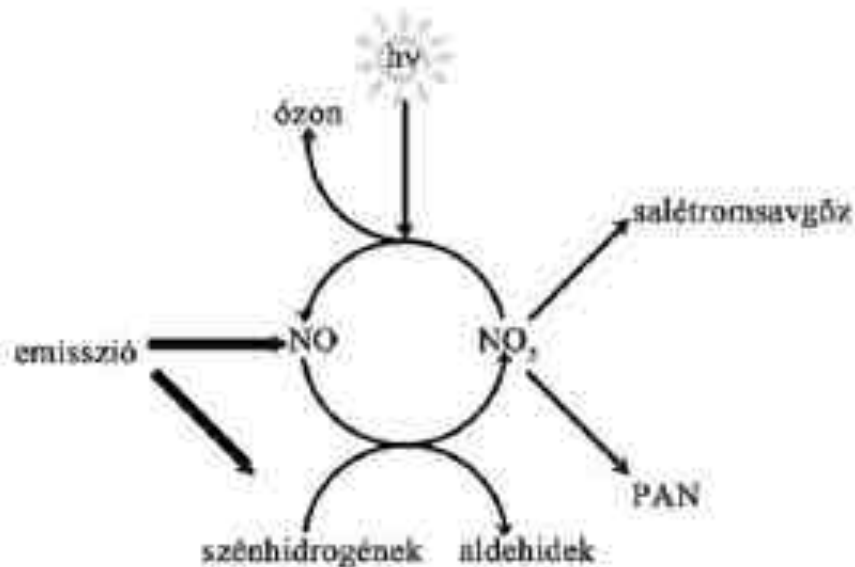
De hogyan keletkezik a felszín közelében a hidroxilgyök forrását biztosító ózon? Az ózon sem a növényekből, sem égési folyamatokból nem szabadul fel, és oxigénből való keletkezéséhez olyan nagy energiájú (200 nm-nél rövidebb hullámhosszú) ultraibolya sugárzásra lenne szükség, ami a felszín közelébe – szerencsére – nem jut le. Az ózon képződését a talaj közelében a nitrogén-monoxidból képződő nitrogén-dioxid biztosítja, ami nemcsak az ultraibolya, hanem még a látható kék fény hatására is képes az ózon képződéséhez szükséges atomos oxigénné bomlani.



A nitrogén-monoxid a talaj mikrobiológiai folyamatainak melléktermékeként, égési folyamatokban a tüzelőanyag nitrogéntartalmának oxidációjával vagy nagyobb hőmérsékleten (pl. villámláskor vagy belsőégésű motorokban) a levegő oxigénjének és nitrogénjének egyesüléséből keletkezik. A levegőben könnyen oxidálódik nitrogén-dioxidra, oxidációjára az ózon mellett a hidroxilgyök láncreakcióiban melléktermékként keletkező másodlagos anyagok (gyökök) is képesek. Mivel a $\text{NO} \leftrightarrow \text{NO}_2$ hatékonyan egymásba alakulnak, a nitrogén-oxidok már kis koncentrációban is képesek a légkör tisztulásához szükséges folyamatokat fenntartani.

A fotokémiai szmog képződésének kémiai körfolyamata

A nagy koncentrációban jelenlevő kiindulási vegyületekből rövid idő alatt nagy mennyiségben keletkeznek oxigéntartalmú szerves vegyületek, aldehidek, elsősorban a formaldehid és az acetaldehid. A nitrogén-oxidok egy része szalicilonsavgőzzé alakul át, az acetaldehid és a nitrát reakciójában az erősen koruyfakasztó hatású peroxi-acetil nitrát (PAN) gőz keletkezik. A körfolyamat fő terméke ilyenkor az ózon, amely a kiindulási anyagok koncentrációjához képest jelentős mértékben felúszik. A fotokémiai szmogra jellemző vegyületek nem egyidőben keletkeznek, hanem a kémiai reakciók által meghatározott sorrendben követik egymást. A rendkívül bonyolult körfolyamat lényegét az 5. ábra szemlélteti.



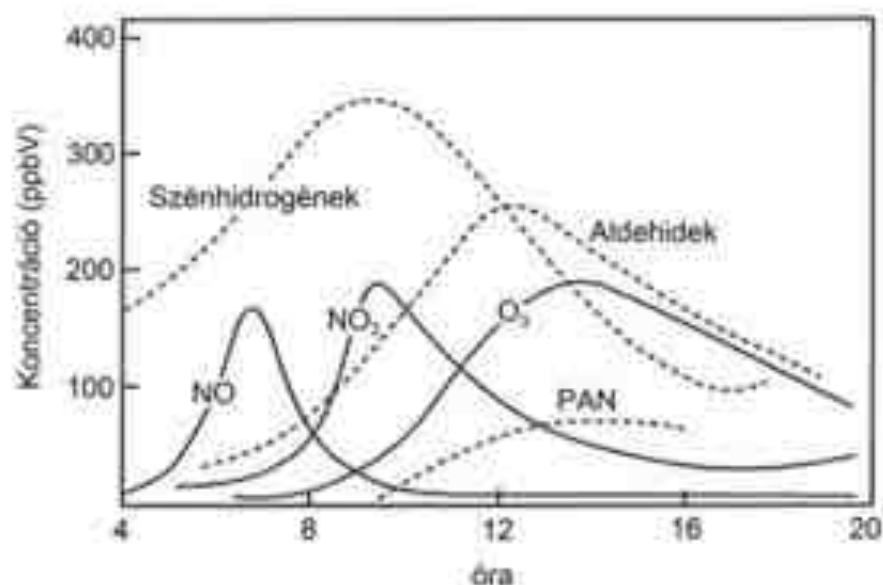
5. ábra

A fotokémiai szmog kialakulásának egyszerűsített körfolyamata

A fotokémiai szmog képződésének időbeli folyamata

Nagyvárosokban szmoghelyzetben először a reggeli csúcsforgalomban kibocsátott nitrogén-monoxid és szénhidrogének kezdenek felülszűlni, majd a napsugárzás erősödésével megkezdődik átalakulásuk (6. ábra). A nitrogén-monoxidból nitrogén-dioxid keletkezik, amelynek a koncentrációja a késő délelőtti órákig növekszik, a szénhidrogének aldehidekké és más oxigéntartalmú vegyületekké alakulnak át. Az átalakuláshoz szükséges hidroxilgyököket eleinte – a légtér természetes tisztulási folyamataitól eltérően – a járművek által kibocsátott salétromsav (HNO_3) fotokémiai bomlása szolgáltatja.





6. ábra

A fotokémiai szmog összetevőinek koncentrációi a napszak függvényében (1 ppb = egy a milliárdhoz).

Amint megjelenik és intenzívebbé válik a nitrogén-dioxid fotokémiai bomlását előidéző ultraibolya sugárzás, megkezdődik és gyorsul az ózon képződése, a késő délelőtti óráktól növekedésnek indul az ózon koncentrációja, és a fotokémiai folyamatokhoz szükséges hidroxilgyökök keletkezését egyre inkább az ózon fotokémiai bomlása határozza meg. A nitrogén-dioxid légköri koncentrációja az ózon keletkezése miatt csökken, miközben növekedésnek indul olyan harmadlagos szmog összetevők koncentrációja, mint például a PAN. Késő délután a napsugárzás intenzitásának csökkenésével ugyan a fotokémiai folyamatok sebessége is csökken, de ezzel a keletkezett összetevők bomlása is lelassul, így koncentrációjuk egymás közti reakciókban csak lassan csökken a következő nap reggeléig.

A fotokémiai szmog elmélyülése

A fotokémiai szmog akkor válik veszélyes mértékű levegőtisztasághelyezéssé, ha a képződéséhez kedvező meteorológiai feltételek több napon (esetleg héten) keresztül fennállnak. Ilyenkor ugyanis az előző napokon keletkezett levegőtisztasághelyezők is megmaradnak és részt vesznek a folyamatokban, és az újonnan keletkező anyagok koncentrációjának növekedése az előző napról visszamaradt koncentrációszintról indul. Fotokémiai szmoghelyzetben a levegőtisztasághelyező anyagokat hatékonyan eltávolító légkörti folyamatok – például csapadékképződés – nincsenek, a kis szélsebesség miatt a levegőben való elkeveredés és hígulás erősen gátolt. A fotokémiai szmog intenzitása tehát kedvező meteorológiai helyzetben napról-napra lépcsőzetesen – igaz, nagyobb koncentrációjánál már egyre csökkenő ütemben – növekszik.

A fotokémiai szmog földrajzi kiterjedése

Az idő előrehaladtával nemcsak a fotokémiai szmog intenzitása növekszik, hanem a levegőtisztasághelyezés egyre kiterjedtebbé is válik. Ennek egyik oka, hogy a szmog kialakulásához kedvező meteorológiai állapot, például egy magasnyomású légkörti képződési (antiklon) rendszerrel több ezer kilométer átmérőjű. A levegőtisztasághelyezés széttérjedésével a folyamatba a növényzet által nagy mennyiségben kibocsátott szénhidrogének is bekapcsolódnak, de a közlekedés kibocsátása sem korlátozódik a nagyvárosokra, hanem az úthálózat mentén kevésbé sűrűn lakott területekre is jellemző. A képződés további jellemzője, hogy a forrásoktól távolodva a fotokémiai szmog képződésének fajlagos hatékonysága növekszik, azaz például 1 molekula nitrogén-monoxid légkörti tartózkodási ideje megnő és ezalatt 12–16 óznmolekulát is képes létrehozni (nagyvárosban csak 2–3-at). Ezáltal gyakran előfordul, hogy a fotokémiai szmog intenzitása nem is a nagyvárosokban a legnagyobb, hanem az azoktól 20–50 km-re lévő vidéki területeken. Fotokémiai szmoghelyzetben városoktól távolabb akár 300 ppb óznmolekulát is mértek.

A fotokémiai szmog, mint a légkör „allergiás reakciójának” terméke

A napjainkban is kiterjedt és súlyos levegőszennyezést okozó fotokémiai szmog tulajdonképpen a légkör öntisztulási mechanizmusának „túlműködése”. Ha a légkört az emberi szervezethez hasonlítjuk, akkor az öntisztulási mechanizmus az immunrendszer működésének felel meg, a fotokémiai szmog annak túlműködésének, például az allergiának. Miként az emberi szervezet allergiás reakcióban, fotokémiai szmog esetén a légkört kémiai folyamatok is termelnek olyan kémiai anyagokat, amelyeket egyébként nem, más anyagokból pedig a normálisnál sokkal többet. Szmoghelyzetben a meteorológiai helyzet miatt állandó kibocsátás mellett is felgyülemlik a nitrogén-oxidok és szénhidrogének túlterhelik a légkör természetes öntisztulási rendszerét.

A látható levegőszennyezés

A kifejlődött fotokémiai szmog szabad szemmel is jól megfigyelhető. Ennek oka a látható fényt szórní vagy elnyelni képes aeroszol részecskék jelenléte. Ezek egy része közvetlenül az emberi tevékenységből származik, de légkört reakciókban jelentős mennyiségben keletkeznek ún. másodlagos vegyületek (ammónium-szulfát és -nitrát, oxigéntartalmú szerves vegyületek). A részecskék nagy számban vannak jelen (szármak a levegő minden egyes köbcéntiméterében akár több tízezer is lehet) és akadályozzák a látható fény terjedését. Ilyenkor száraz levegőben is jelentősen lecsökken a látótávolság (5–10 km-re levő tereptárgyakat már nemigen lehet látni), az égolt színe pedig kékről fehéresre változik. Legjobban mégis napnyugtakor figyelhető meg a keleti horizonton a felszín feletti – repülőgépről különösen jól látható – barnássárga homályos réteg formájában. A több mint 2000 m magasságban fekvő 20 millió lakosú Mexikóváros egyike a világ legrosszabb levegőjű nagyvárosainak. Fekvésénél fogva a fotokémiai szmog képződése dominál. Az ózonkoncentráció például az év napjainak 90%-án meghaladja a határértéket, 40–50 napon pedig annak háromszorosát is (7. ábra).



7. ábra
Fotokémiai szmog Mexikóváros felett.

A fotokémiai szmog megszűnése és mérséklésének lehetőségei

A fotokémiai szmog csak akkor szűnhet meg, ha a képződéséhez kedvező meteorológiai helyzet megszűnik. Erős széllel és csapadékkal érkező hidegfront például azonnal véget vet a szmoghelyzetnek, de a szél vagy a kiadósabb csapadék külön-külön is jelentősen enyhíthet rajta. Kijelenthetjük tehát, hogy a fotokémiai szmog alapvetően a meteorológiai helyzet következménye, hiszen adott időszakban a légszennyező források intenzitása többé-kevésbé állandónak tekinthető. A fotokémiai szmog mérséklésének lehetőségei korlátozottak, nagyvárosokban a közlekedési eredetű nitrogén-oxid és szénhidrogén ki-

bocsátás helyi csökkentésével csak rendkívül mérsékelt eredményt lehet elérni. Persze a járművek és az ipari létesítmények nitrogén-oxid és szénhidrogén emissziójára vonatkozó előírások szigorítása azért hosszú távon képes mérsékelni a fotokémiai szmog epizódok intenzitását: e levegőszennyezési forma névadó városában, Los Angelesben²³ például a felszínközeli ózon átlagos koncentrációja az 1970-es évekbeli 120 ppb-ról 2010-re 100 ppb-re csökkent annak köszönhetően, hogy a járművek engedélyezett nitrogén-oxid kibocsátását mérfoldenként 3 grammról 0,1 grammra mérsékelték. Ennek köszönhetően 1980 és 2010 között a szén-monoxid koncentrációja 80%-kal, a nitrogén-oxidoké 60 %-kal csökkent. Hazánkban az 1980-as években még egy benzinüzemű gépjármű kb. 1,5 gramm nitrogén-oxidot bocsátott ki kilométerenként, napjainkban az előírások már csak 60 milligramm kibocsátást teszik lehetővé. Mivel időközben a gépjárművek száma és összes fűtésteljesítménye növekedett, a nitrogén-oxidok kibocsátása Magyarországon csak mérsékeltén csökkent, 1980-hoz képest mindössze 20%-kal. Ugyanezen időszak alatt a felszínközeli ózon koncentrációjában csak 6% volt a csökkenés.

²³ A fotokémiai szmogot a környék inkább Los Angeles típusú szmogként ismerik.

IV. FEJEZET

NAGYLÉPTÉKŰ LEVEGŐSZENNYEZÉS

Eddig olyan jelenségekkel foglalkoztunk, amelyek beleillenek a levegőszennyezésről alkotott hagyományos felfogásba, azaz hogy hogyan változtatják meg a levegőbe bocsátott szennyezőanyagok környezetünkben a levegő minőségét, és ennek milyen környezeti hatásai lehetnek. Az emberiség lélekszáma és az emberi tevékenységek összessége azonban napjainkra átlépett egy olyan határt, amelyben az emberiség természetalkító tényezővé vált. Úgy is mondhatjuk, hogy az emberiség a közelmúltban egy új földtörténeti korszakot nyitott, amit antropocénnek nevezünk. Ebben a korszakban már bizonyos régiókban olyan léptékű levegőszennyezés alakult ki, ami a világból is megfigyelhető és ami összességében a Föld-légkör rendszer működését befolyásoló globális tényezővé vált. Ebben a fejezetben a nagyléptékű levegőszennyezés témakörében a biomassza égetéshez köthető szuperszmoggal és az egyik legérzékenyebb régiót, az Északi-sark vidékét érintő arktiszi szmoggal foglalkozunk.

4.1. fejezet Biomassza égetés

A tűz és az ember

A biomassza égetésből származó levegőszennyezés – igaz, eleinte elsősorban barlangokban és sátrakban – az első foglalkozási ártalom lehetett, minden bizonnyal súlyos következményekkel. Hatásai alól az emberiség a mai napig nem tud mentesülni, napjainkban már globális tényező. Ennek ellenére a biomassza égetésből származó kibocsátás csak nagy bizonytalansággal számszerűsíthető, ugyanis a fosszilis energiahordozókkal ellentétben az elégetett biomassza mennyisége és az égés körülményei csak közvetett módon becsülhetők. A Földön a biomassza égése a szárazföldi növényzet elterjedésével egyidős a felhalmozódott éghető növényi anyagot időszakosan villámok által keltett tűzvészek emésztették el. Az ember megjelenésével ez az egyensúly is megváltozott, igaz, sokáig csak csekély mértékben. A tűz tudatos használatának első nyomainak mintegy 1,5–2 millió évvel ezelőtről származnak. Geológiai bizonyítékok, elsősorban faszénmaradványok alapján az ember 40 ezer évvel ezelőtt az égetéssel egész kontinensek élővilágára kimutatható hatást gyakorolt.

A biomassza égetésének formái

A biomassza égetés nem egységes tevékenység, világszerte különböző célokkal alkalmazzák. Legjelentősebb és legismertebb az erdők és cserjés területek felégetése termőföld nyerése céljából. Becslések szerint világszerte évente mintegy 22 millió hektár erdő válik a lángok martalekává. A fák tömegének mintegy 40%-a az égetés során a légkörbe jut. Nem kevésbé jelentős a bozótosok és gyomnövények visszaszorítása és a hulladékfelhalmozódás megakadályozása céljából végzett égetés a szavannákon és termőföldeken. Évente 750 millió hektáron ég a szavanna, ami egységnyi területen az erdőkhöz képest

lényegesen kisebb tömegű biomasszát érint, de az égetésre sokkal gyakrabban, 1–3 évente kerül sor. Kisebb jelentőségű mezőgazdasági területeken a tápanyag-regenerálás céljából végzett égetés, vagy erdők szabályozott égetése a nagy mennyiségű éghető hulladék felhalmozódásának megakadályozására. A faszén előállítása és a sütés-főzés, illetve háztartási fűtés céljából történő biomassza alapú tüzelés közvetlenül és tartósan emberek milliárdjait érinti világszerte.

A szuperszmog (ABC)

A biomassza égetés az ezredfordulóra világszerte olyan méreteket öltött, hogy az általa előidézett légköri jelenséggel kapcsolatban 2003-tól egy új rövidítés honosodott meg az angol szaknyelvben. Az ABC az „*Atmospheric Brown Clouds*” kifejezés³⁴ kezdőbetűiből áll össze, kontinensnyi kiterjedésű, hosszantartó, döntően a biomassza égetés által előidézett súlyos levegőtisztasági jelet. Magyar fordítása a szuperszmog lehetne, amelyben a „szuper” jelző a jelenség súlyosságára, földrajzi kiterjedésére és tartósságára egyaránt vonatkozik. A névadást, amely az ózonbomlás kémiai mechanizmusának felfedezését 1995-ben kémiai Nobel-díjjal kitüntetett Paul Crutzen és a neves indiai légkörkutató V. Ramanathan nevéhez fűződik, az amerikai Denver városa fölött gyakran kialakuló szmog, az 1970-es években hírhedtté vált „Denver Brown Cloud” ihlette.

A szuperszmog előfordulása

Az ABC szuperszmog azonban már a nevadáskor alaposan felülmúlta névadó elődjét. Jellemzően nem nagyvárosi levegőtisztasági jelet, hanem hatalmas, majdnem kontinensnyi területek felett alakul ki a tró-

³⁴ Szó szerinti fordítása *légköri barna felhők*.

pusi övben található fejlődő országokban. Így előfordul az indiai szubkontinensen, Kína keleti vidékein, Délkelet-Ázsiában, Közép-Afrikában, Mexikóban és Közép-Amerikában, valamint Brazília és Peru nagy részén. Angol elnevezése (*cloud*) hibás, csakúgy, mint több más légkörkémiai jelensége (ozonlyuk, fotokémiai szmog, savas eső). Ugyanis nem folyékony vízcseppeket vagy jégkristályokat tartalmazó „klasszikus” felhőről van szó, hanem sárgásbarna színű, a mikrométernél kisebb méretű (az emberi hajszál átmérőjének 1/10-ed része), főleg széntartalmú részecskékből álló, erősen szennyezett levegőről. A részecskék közvetlen fenyelnyelése miatt a magasban a levegő jobban felmelegszik, míg a felszín kevesebé, így a levegő feláramlása és a tényleges felhőképződés szennyezett levegőben gátolt. Legnagyobb kiterjedésű és a legtöbbet tanulmányozott előfordulása az indiai szubkontinens és az Indiai-óceán északi medencéje felett a több mint fél évig tartó száraz évszakot végigkísérő szuperszmog. Indonézia felett bizonyos években még súlyosabb szuperszmog is kialakulhat, de rendszerint „csak” 2–3 hónapig tart.

A szuperszmog forrásai

A szuperszmogot előidéző szennyezőforrások döntően nem ipari létesítmények, hanem rossz hatásfokú égési folyamatok, melyek sűrűn lakott területeken az emberek mindennapi tevékenységéhez kötődnek. Ilyen például a sütés-főzés kezdetleges tűzhelyeken tűzfával, növényi hulladékkal vagy szárított trágyával, de az erdőégetés vagy a mezőgazdasági hulladékok felegetése is. Nem elhanyagolható tényező, hogy a fejlődő országok hatalmas metropoliszaiban gyorsan gyarapodik a gépkocsik és motorkerékpárok száma, melyek állapota és a karbantartása sok kívánnivalót hagy maga után. Ezek alapján aligha meglepő, hogy a szuperszmog egészségkárosító hatása a Föld népességének közel felét közvetlenül érinti, miközben már a Föld éghajlatának egészére is mérhető hatást gyakorol.

A szuperszmog tulajdonságai

A szuperszmog gázok, gőzök és részecskék elegyéből áll. A széntartalmú részecskék mellett a nitrogén-oxidokból, illetve a kén-dioxid átalakulásával keletkező nitrát- és szulfát, valamint az ásványi por is fontos alkotórésze. A gázok közül legjelentősebb a nitrogén-dioxid, a szén-monoxid és az ózon. A tökéletlen égés során keletkező korom a szuperszmog egyik legfontosabb komponense. A széntartalmú alkotók között a koromrészecskék mellett több száz toxikus, rákkeltő vagy mutagén szerves vegyület is megtalálható. A tökéletlen égésből származó szennyezőanyagok a légkörben jelentős változásokon mennek át. A gázok kémiai folyamatokban átalakulnak (oxidálódnak), belőlük részecskék keletkeznek, a gőzök a részecskék felületén kondenzálódnak. A száraz évszakban csapadék híján a légszennyező anyagok, különösen a részecskék rendkívüli mértékben felgyűlnek és hatalmas területek fölött olyan mértékű szmogot hoznak létre, amely a fejlett országokban még nagyvárosokban is csak ritkán fordul elő. Ráadásul ez a szmog a nagyvárosi levegőtisztítástól eltérően nemcsak a felszín közelében, hanem akár 3–4 km-es magasságig terjed. Olyan is előfordul, hogy a részecskék feljebb nagyobb koncentrációban fordulnak elő. A szuperszmog koromtartalma 2–3-szorosa az Európa és Észak-Amerika nagyvárosaiban mért értékeknek, hiszen jóval nagyobb a tökéletlen égési folyamatok aránya. A szuperszmog az elsődleges levegőtisztítás és a fotokémiai szmog sajátos keveréke.

A koromrészecskék szerepe

A koromrészecskék többnyire nem önmagukban, hanem más részecskéikkel összetapadva fordulnak elő. A korom a légkör egyetlen, a napsugárzást rendkívül nagy hatékonysággal elnyelni képes komponense. A szuperszmozban azonban a korom mellett más, fényt nyelő tulajdonságú, tehát színes anyagok is megtalálhatók, amelyek a biomasza égéséből származnak. Ezek az anyagok, amelyeknek fényt nyelése jelentősen kisebb a koroménál, a rövidebb hullámhosszú fényt

jobban elnyelik, mint a hosszabbat, ezért nagyobb tömegben barnának látszanak. A korombocskát nagymértékben függ az alkalmazott égéstechnológiától és a tüzelőanyag fajtájától. Például ha a kőszent modern erőműben égetjük el, akkor 1 kg szárazanyagra vetítve mindössze 2 mg korom keletkezik. Ha ugyanazt a szenet kályhában tüzeljük el, akkor pedig 5200 mg! A nyílt biomassza égés (erdő és szavannaégés) során pedig jellemzően 400–800 mg. Belsőégésű motorok korombocskátása között is jelentős különbség lehet: egy korszerű dizelmotor 1 kg üzemanyag felhasználásával mindössze 60 mg koromrészecskét termel, addig egy rosszul beállított, korszerűtlen motor ennek akár a 70-szeresét.

A szuperszmog regionális éghajlati hatásai

Az indiai szubkontinens és az Indiai-óceán északi része felett kialakuló szuperszmog olyannyira kiterjedt és tartós, hogy rajta keresztül a levegőszennyezés éghajlatra gyakorolt hatása is tanulmányozható. A Dél- és Délkelet-Azsiából származó légszennyező anyagok a minden évben novembertől májusig tartó száraz évszakban felhalmozódnak és a Perzsa-öböltől a Bengáli-öblön át az Indiai-óceán északi részéig terjedő masszív szmogot hoznak létre. A szuperszmog alkotóinak együttes hatására e régióban a Föld felszínét elérő napsugárzás intenzitása akár 5–15%-kal is csökkenhet. Nagyobb magasságokban a koromrészecskék nemcsak a beérkező, hanem a felszínről vagy a felhőkről visszaverődő napsugárzás egy részét is elnyelik. Emiatt a légkör akár 50–100%-kal is jobban felmelegedhet, mint tiszta szmogmentes időben. A szuperszmog átvételező hatása miatt az indiai szubkontinens felszíne és az Indiai-óceán északi része kevésbé melegszik. E régiókban az energiamérleg megváltozása miatt az óceán felszínéről kevesebb víz párolog el. Ezért a monszunpályák délebbre helyeződnek át, így a szárazföldre kevesebb csapadék hullik. A csapadékmennyiség csökkenése miatt a rizstermelés hozama Indiában máris jelentősen visszaesett. Ezt a folyamatot az is erősíti, hogy erősen szennyezett levegőben a felhők nagyszámú, de kisebb cseppekből állnak, melyekből

csak ritkán képződik csapadék³⁵. A magasban a szennyezett levegő a Himalája felé vándorol, ahol a kiülepedő koromrészecskék elszennyezik a hófelszínt, lecsökkentve annak fényvisszaverő képességét (albedóját). A hatás akkora, mintha négyzetméterenként 20 W teljesítménnyel melegítenénk a havat, ami a gleccserek gyorsabb olvadásához vezethet.

4.2. fejezet Az arktiszi szmog

Levegőszennyezés az Arktisz felett

Az Északi-sarkvidéket, az Arktiszt sokáig a legtisztább földrajzi helyek egyikének vélték. Az 1950-es években azonban a kanadai Arktisz felett haladó repülőgépek pilótái felfedezték, hogy a tájat télen és kora tavasszal rendszeresen nagy kiterjedésű füstköd borítja. Az azonban csak az 1970-es évekre vált tudományosan is elfogadott tényé, hogy ez a füstköd tulajdonképpen a kontinensekről exportált levegőszennyezés. Előfordulása időszakos, legnagyobb koncentrációban tél végén és kora tavasszal fordul elő. Kialakulását és fennmaradását jelentős részben annak köszönheti, hogy ilyenkor az Arktisz feletti rendkívül száraz és stabil rétegzettségű levegőben a kimosódás és ülepedés folyamata rendkívül lassú. A felszín közelében rendszerint már áprilisra feloszlik, de előfordulhat, hogy magasabb légrétegekben még május közepéig fennmarad.

³⁵ A felhők többsége elpárolog, körülbelül minden tizedik felhőből lesz csapadék.

Az arktiszi szmog forrásai és mértéke

Az Arktisz feletti levegőt a légkör többi részétől az ún. polár front választja el, ami hatékonyan zárja el a körbezárt sarkvidéki területet a levegőszennyezéstől. Tél közepén azonban ez a védőkupola Eurázsia irányában akár a 40 szélességi fokig is leérhet, így az e területen kibocsátott légszennyező anyagok szinte akadálytalanul juthatnak el az Északi-sarkvidékre. Az áramlás ilyenkor meglehetősen gyors, és az Arktiszon keresztül Észak-Amerika felé irányul. A Kelet-Ázsiában és Észak-Amerikában kibocsátott levegőszennyezők elsősorban Grönland magasabban fekvő területeit érintik. A Dél-Ázsiából származó levegőszennyezés egy része azonban eléri az Arktiszt. A szennyezőanyagok túlnyomó része délebből, a Kamcsatka-félszigetről, Oroszország északi területein működő ipari üzemekből, a tengerhajózásból és kőolaj kitermelésből származik. Tavasszal, illetve nyáron a meteorológiai viszonyok miatt a kontinensek felől a levegőszennyezés még könnyebben elérheti az Arktiszt. A tavaszi hónapokban a koromrészecskék fő forrása a Kelet-Európában elterjedt mezőgazdasági hulladékégetés. Az Arktisz felett az eddig megfigyelt legnagyobb koncentrációjú szmog 2006 tavaszán alakult ki a balti államokban, Fehéroroszországban és Ukrajnában égő mezőgazdasági tüzek füstjéből. A sarkkörön túl fekvő Spitzbergákon mért koncentráció a köbméterenkénti 30 mikrogramm értéket is meghaladta, azaz megközelítette az európai nagyvárosokban definiált egészségügyi határértéket ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Csak összehasonlításként, ugyanezen a mérőállomáson korábban hasonló időszakban ennek a tizedét sem mérték. Különösen meleg és száraz nyarakon a Kanadában és Oroszországban szinte megfékezhetetlenül tomboló hatalmas erdőtüzek füstje okoz a sarkkörön belül súlyos levegőszennyezést. 2014 nyarán Kanadában háromszor akkora területen pusztítottak erdőtüzek, mint az elmúlt 25 év átlaga. Az erdőtüzek drámai következménye Grönland gleccsereinek még a média ingerküszöbét is elérő feketedése volt, amely minden korábbi rekordot megdöntött.

Az arktiszi szmog legfontosabb összetevője: a koromrészecskék

Az arktiszi szmog összetételét tekintve elsősorban a kén-dioxid átalakulásából származó szulfátból és égési folyamatokból származó szerves részecskékből, valamint koromból, nitrátból és ammóniumból áll. Gázfázisú összetevői a nitrogén-oxidok, a szén-monoxid és az illékony vegyületek. Mivel forrásaitól hosszú utat tesz meg, viszonylag nagyobb méretű, a napsugárzást hatékonyan visszaverő és kisebb mértékben elnyelő tulajdonságú víztartalmú részecskékből áll. A tökéletlen égésből származó koromrészecskék rendkívül hatékonyan képesek elnyelni és hőenergiává alakítani a napsugárzást, amit a levegő gáznemű alkotói átengednek. Ennek oka, hogy a koromrészecskék nemcsak a Naptól érkező, hanem a felszín vagy a szmogban található más részecskék által visszavert sugárzást is elnyelik. E hatások miatt a felszín és a fölette levő szmogréteg melegszik. De a korom még azt követően is hatékony fénnyelnyelő anyag marad, miután kitelepedett a légkörből a hó- vagy jégfelszínre. A korommal szennyezett jégfelszín napsugárzás visszaverő képessége (in albedója) a korom koncentrációjától függően jelentősen csökken: már 25 ng/g koncentrációban (25 az egymilliárdhoz arányban) is 2%-kal csökkenti a jégfelszín albedóját. Ennek következtében a hó, illetve a jég által elnyelt sugárzási energia mennyisége megnövekszik, ami növeli a hőmérsékletet és elősegíti az olvadást. Ez egybevág azzal a hétköznapi megfigyeléssel, mely szerint a piszkos hó gyorsabban olvad, mint a vakítóan tiszta.

Az arktiszi levegőszennyezés trendje

Az Északi-sarkvidék átlaghőmérséklete az elmúlt évtizedekben lényegesen nagyobb mértékben emelkedett, mint a Föld globális átlaghőmérséklete. Az erdőtüzek gyakoriságának és intenzitásának növekedése a légszennyezésen keresztül hozzájárul a tengerjég olvadásához, ami az elnyelt napsugárzás miatt további hőmérséklet-emelkedés-

Észre ment bolygó

hez vezet. A szabadabbá váló hajózási útvonalakon megnövekedett tengerhajózás további légszennyező anyagokkal, köztük koromszészecskékkel terheli az Arktisz légkörét, miként az energiahordozók és nyersanyagok kitermelése is. Az Arktisz gyorsabb melegezése miatt az sem zárható ki, hogy a jövőben az Arktisz feletti hideg levegőkúpja gyengül, és kevésbé lesz képes akadályozni a légszennyező anyagok transzportját. Ugyanakkor tény, hogy az arktiszi szmog nagy részét adó forrásterületeken (Dél-Ázsia kivételével) a légszennyező anyagok kibocsátása számottevően csökkent, a korom esetében legalább a harmadára esett az 1980-as évhez képest. A hóban mért koromkoncentrációk trendjében is érzékelhető ez a változás, másfél évtized alatt több mint 50%-os a csökkenés.

V. FEJEZET

GLOBALIS LEVEGŐSZENNYEZÉS

5.1. fejezet A sztratoszferikus ózonréteg változásai, az ózonlyuk

A sztratoszferikus ózonréteg

A Föld felszínét ózonréteg védi a Nap élő szervezetek számára káros ultrabolya sugárzásától. Az ózonréteg a felső légkörben található, az ún. sztratoszférában, döntően 20–40 km közötti magasságban. Természetesen ebben a tartományban is a nitrogén és az oxigén a levegő fő alkotója, az *ózonréteg* kifejezés csak annyit jelent, hogy itt az ózontól 10-szer annyi található, mint a felszín közelében. Mivel az ózonréteg tartományában a levegő nyomása nagyon kicsi (20 km-en huszad-, 50 km-en pedig már csak ezredrésze a tengerszinten mért légnyomásnak), a több mint 20 km vastag ózonréteg a valóságban nagyon kevés ózont tartalmaz: a földfelszínen tiszta formában mindössze 3 mm vastag gázréteget alkotna! Légköri mennyiségét is ez alapján mérik ún. Dobson egységben (DU). 1 Dobson egység 0,01 mm vastag tiszta gázrétegnak felel meg, a Földön az ózonréteg átlagos vastagsága tehát 300 DU. Az

Fizibe ment bolygó

ózonréteg létezését elsőként Hartley bizonyította 1858-ban a Nap ultraibolya sugárzásának légkori elnyelődését tanulmányozva.

Az ózon képződése

Az ózon három oxigénatomból álló molekula, a sztratoszférában oxigénmolekulából keletkezik a Nap nagy energiájú ultraibolya sugárzásának a hatására. A nagy energiájú sugárzás felszakítja az oxigénmolekulában a két oxigénatom közötti kötést, a szabaddá váló oxigénatom pedig egy másik oxigénmolekulával egyesülve ózommolekulát hoz létre. A folyamatban tehát a sugárzási energia kémiai energiává alakul át. Az ózon keletkezése ezért csak a sztratoszféra felső részében hatékony, ahol még van elegendő nagy energiájú sugárzás, de már van elegendő oxigénmolekula is. Kisebb magasságokban hiába van jóval több oxigénmolekula a nagyobb nyomás miatt, oda már a kémiai kötés felszakításához szükséges energiájú sugárzás nem jut le.

Az ózon jelentősége

Természetesen a képződő ózommolekula sem képes ellenállni az ultraibolya sugárzásnak, kémiai kötése már kisebb energiájú (nagyobb hullámhosszúságú) ultraibolya sugárzás hatására is felszakadnak. Éppen ez a tulajdonsága teszi egyedivé és nélkülözhetetlenné a földi élet számára: a légkör egyetlen alkotója, amely képes elnyelni a 280 nanométernél kisebb hullámhosszúságú, a DNS-t károsító ultraibolya sugárzás (az ún. UV-C sugárzás) egészét, és a 280 és 320 nm közötti ún. UV-B sugárzás nagy részét. Tehát az ózon is kémiai energiává alakítja a sugárzási energiát, miközben maga oxigénmolekulává alakul vissza.

Az ózonsztratoszféra dinamikus jellege

Az ózon tehát a sztratoszférában folyamatosan képződik és bomlik is, a két folyamat egymással egyensúlyban van, és ez tartja fenn az ózonsztratoszférát. Olyan ez, mint amikor a fürdőkádban egyszerre van nyitva a csap és a lefolyó is: a befolyó víz az ózonképződést, a kifolyó víz az ózombomlást, a kádban lévő állandó vízmenyiség pedig a sztratoszférában lévő ózonsztratoszféra vastagságát jelképezi. Az ózonsztratoszférában az ózon átlagos tartózkodási ideje 3–4 hónap. Ez azt jelenti, hogy az ózonsztratoszféra átlagosan ennyi idő alatt megújul. A dinamikus folyamatok ellenére az ózonsztratoszféra rendkívül stabil és több mint 300 millió éve a maihoz hasonló állapotban létezik.

Az ózonsztratoszféra stabilitása

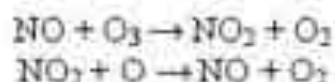
Hogyan lehetséges az, hogy miközben a Föld az elmúlt 300 millió évben hatalmas változásokat szenvedett el, az ózonsztratoszféra gyakorlatilag változatlan állapotban maradt? Erről kettős szabályozó mechanizmus gondoskodik, úgy is mondhatnánk, hogy az ózonsztratoszféra páratlan öngyógyító és stabilizáló képességgel rendelkezik. Ha valamilyen okból hirtelen csökkenne az ózon mennyisége, akkor a bomlásának a sebessége is lecsökkenne, így az állandó mértékű képződés visszaállítaná a korábbi állapotot.³⁶ A stabilizálás az ellenkező irányban is hasonlóképpen működik. Továbbá ha az ózon egy része eltűnne a sztratoszférából, akkor annak hőmérséklete csökkenne.³⁷ Alacsonyabb hőmérsékleten pedig csökken az ózombomlás sebessége, így hamar helyreállna az egyensúlyi ózonsztratoszféra.

³⁶ Gondoljunk arra, hogy ha a képzeletbeli fürdőkádból lemerünk vödörrel valamennyi vizet, akkor alacsonyabb vízszint mellett kevesebb víz távozna a lefolyón, az állandó sebességgel befolyó víz pedig hamar helyreállítaná az egyensúlyi állapotot.

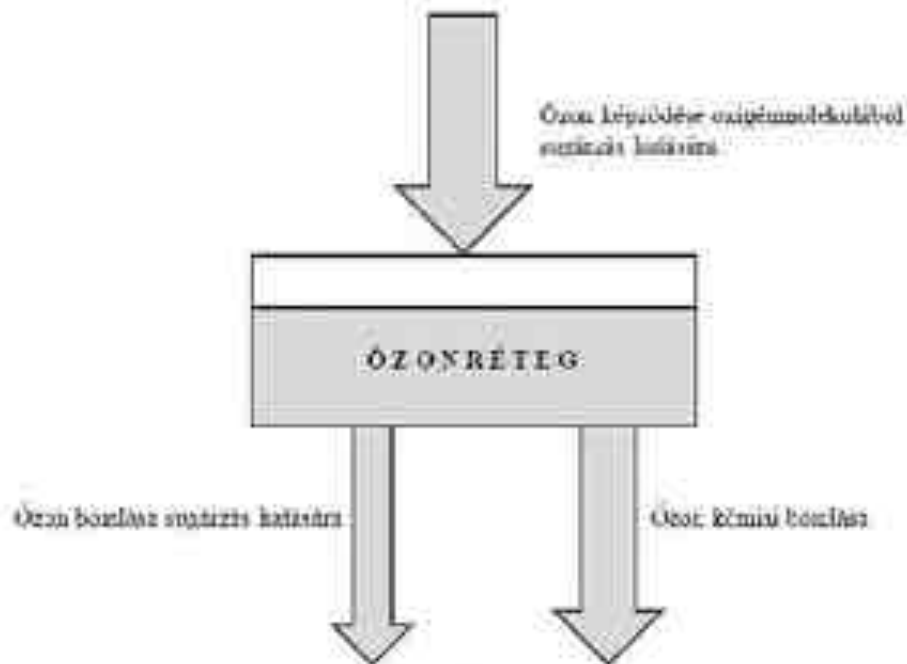
³⁷ A sztratoszférában ugyanis a magassággal növekvő hőmérsékletet éppen az ózon sugárzáselnyelése tartja fenn.

A kémiai ózonbomlás

A fenti stabilizáló mechanizmusok mellett az ózonrétegnek gyakorlatilag sebezhetetlenné kellene lennie, hogyan tudott rajta mégis az emberi tevékenység mindössze néhány évtized leforgása alatt rést utni? Ennek megértéséhez kissé pontosítanunk kell az ózonképződés és -bomlás egyensúlyi modelljét: az ózon bomlása ugyanis nem kizárólag az ultrabolya sugárzás hatására történhet, hanem lehetséges kémiai (ún. katalitikus) bomlás is. Erre csak az 1970-es években jött rá Paul Crutzen, Sherry Rowland és Mario Molina, és ezt az emberiség sorsát is meghatározó felfedezést 1995-ben kémiai Nobel-díjjal ismerték el. A katalitikus bomlás lényege, hogy a földfelszínről a sztratoszférába feljutó kémiai anyag anélkül tud megsemmisíteni egy ózonomolekulát, hogy önmaga a folyamatban átalakulna. Az ózonbontásban szerepet játszó legjelentősebb nyomanyag, a sztratoszférába feljutó dinitrogén-oxidból keletkező nitrogén-monoxid katalitikus reakciója például:



A nitrogén-monoxid mellett a klór- és bromatom, valamint a hidroxilgyök rendelkezik ózombontó képességgel. Annak ellenére, hogy magában a katalitikus reakcióban ezek a nyomanyagok nem semmisülnek meg, más folyamatokban katalitikusan inaktív vegyületekké, ún. tározóvegyületekké alakulhatnak át (ilyenek például a sósav vagy a salétromsav), és ezek révén lassan kikerülhetnek a sztratoszférából. A kémiai bomlási mechanizmusok – korábban nem ismert – szerepe miatt az *ózonréteg állapota felszíni folyamatok által is befolyásolható*, nélkülük teljességgel megváltoztathatatlan lenne. Az ózonréteg dinamikus egyensúlyi jellege természetesen a kémiai bomlási mechanizmus figyelembevételével nem változik meg, amint az a 8. ábrán is látható.



S. ábra

Az ózonképződés és -bomlás egyszerűsített egyensúlyi modellje.

Az ózon kémiai bomlása a közneveléssel ellentétben *természetes* folyamat, amelybe azonban az ember – akaratlan és eleinte tudatlan kívül – az 1930-as évek óta jelentős mértékben beavatkozott. A sztratoszférába kerülő és ózon bomlásában közvetve szerepet játszó kémiai anyagok közül a dinitrogén-oxid (a nitrogén-monoxid forrása) a talajokból, míg a metil-klorid (a klórosten forrása) az óceánokban élő algákból szabadul fel.

Az emberi tevékenység hatása az ózonsztra rétegre

Az emberi tevékenység az ózon kémiai bomlásában szerepet játszó anyagok légköri mennyiségét – a metil-klorid kivételével – az elmúlt évszázadban jelentős mértékben megnövelte. A műtrágyázás révén megnövelt nitrogénellátottságú mezőgazdasági talajokból intenzívebbé

váló kibocsátás következményeként a dinitrogén-oxid légköri koncentrációja az ipari forradalom előtti értékhez képest 20%-kal növekedett. A metán légköri koncentrációja pedig ugyanezen idő alatt megduplázódott a rizstermesztés és a kerődző haszonállatok számának növekedése miatt. Még ennél is súlyosabb következményekkel járt, hogy az ember olyan mesterséges kémiai anyagokat kezdett alkalmazni, amelyek tulajdonságaiknál fogva nagy hatékonysággal képesek a sztratoszferikus ózon kémiai bontásában részt venni. Ezek a freon márkaneven ismert halogénezett szénhidrogének, amelyeket 1930-ban fejlesztettek ki és hűtőgépek, légkondicionálók hűtőközegeként, műanyag habosítóként és aeroszol palackok hajtóanyagaként használtak. Kevésbé ismertek, de nem kevésbé veszélyesek a brómtartalmú halonok, amelyeket tűzoltóberendezésekben alkalmaztak, valamint a klórtartalmú oldószerek, például a vegyiparban elterjedten használt szén-tetraklorid. Ezeknek az anyagoknak az együttes éves felhasználása az 1980-as évek végén „mindössze” 1,5 millió tonna volt. Ezzel szemben a sztratoszferában évente több mint 10 milliárd tonna ózon képződik (és bomlik el), az előbbi mennyiség közel hétézerszerese. A katalitikus bontás hatékonyságát bizonyítja, hogy az ózontelítő anyagok ilyen arányok mellett is néhány évtized alatt érzékelhető változást tudtak előidézni a sztratoszferikus ózonszint állapotában.

Változások az ózonszint állapotában

A kémiai ózontelítő mértékének növekedésével a sztratoszferikus ózon egyensúlyi mennyisége változott meg, hiába maradt lényegében változatlan az ózonkeletkezési sebessége. Ez a globális ózonszint vastagságának csökkenésében érzékelhető. A Föld trópusi és mérsékelt égövi területei felett az ózonszint átlagos vastagsága két évtized alatt 4-6%-kal csökkent. Az ózonszint vékonyodása miatt a földfelszínre érő UV-B sugárzás intenzitása hasonló mértékben megnőtt. Az UV-B sugárzás intenzitásának 1%-os növekedését korábban csak úgy lehe-

tett elérni, hogy 300 km-rel délebbre költöztünk. Most erre nincs szükség, a megnövekedett nagy intenzitású³⁸ ultraibolya sugárzás helybe jön. Hatása egyértelműen kedvezőtlenek: a rosszindulatú bőrelváltozások és szembetegségek gyakoriságának növekedése figyelhető meg, az immunrendszer gyengülése révén csökken a fertőző és daganatos betegségekkel szembeni ellenállóképeség, növekszik az autoimmun és allergiás megbetegedések száma. A megnövekedett UV-B sugárzás a növényekre és az állatokra is kedvezőtlen hatással van, sőt a szerkezeti anyagok (pl. gumi, műanyag) öregítésén keresztül is komoly gazdasági károkat okoz.

Az ózonlyuk kialakulása

Az ózonréteg károsodását a média által formált közvélemény rendszerint az ózonlyuk fogalmával azonosítja. Az ózonlyuk megjelenése azonban a globális ózonréteg fogyásának adott földrajzi helyre (az Antarktisz környezetére) és az év adott időszakára (szeptember-október hónapokra) korlátozódó időszakos, ámde kétségtelenül látványos és ijesztő tünete. Kialakulásához az ózonkárosító anyagok jelenléte mellett sajátos meteorológiai tényezők együttes fennállására van szükség. A déli félgömb telén az Antarktisz feletti levegőt a Déli-óceán feletti állandósult légáramlások szinte körbe emérik, hatalmas kiterjedésű tartós légörvény³⁹ alakul ki. Tekintve, hogy a Föld ilyenkor van a legtávolabb a Naptól, a légörvény belsejében az alsó sztratoszféra hőmérséklete rendkívül alacsonyra, akár $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ alá is süllyed. Ilyen alacsony hőmérsékleten a sztratoszférában jelenlevő ározóvegyület, a salétromsav gőzéből és vízgőzből speciális összetételű jégkristályok képződnek.

³⁸ Un. *errimatális* (a bőrfelület barnulását előidéző) sugárzás

³⁹ Un. *vortex*.

Az ózonlyuk kémiaja

A korábban kibocsátott és a légkörben feldúsuló ózonkárosító anyagokból képződő tározóvegyületek – amelyek egyébként közvetlenül nem képesek az ózon bontásában részt venni – a jégkristályok felületén egymással kémiai reakcióba lépnek. A keletkezett egyik reakciótermék, a salétromsav $-78\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatti hőmérsékleten kifagy és a jégkristályokban marad, így a gázfázisban maradó másik reakciótermék, a klórgáz már nem képes újból ártalmatlan tározóvegyületté visszaalakulni. A tél végén a Nap megjelenő sugarai a klórgázt klóratomokra bontják, amelyek nagy hatékonysággal kezdik bontani az ózon molekuláit. A hatalmas léptékű és példátlan mértékű ózonpusztítások – akárcsak a felszín közelében a szmoghelyzeteknek – a meteorológiai helyzet megváltozása, a légörvény megszűnése és feloszlása vet véget november elejére, ami után az ózonréteg természetéhez közeli állapota helyreáll.

Derült égből ózonlyuk

Az intenzív és hosszantartó ózonpusztítás eredményeképpen az Antarktisz felett több mint 25 millió négyzetkilométeren⁴⁰ az ózonomolekulák mintegy 60 %-a évről-évre időszakosan eltűnik. Az ózonlyuk kifejezés túlzás, hiszen az ózon csak 15 és 19 km-es magasság között fogy el teljesen, felette és alatta marad belőle. Két hónap leforgása alatt összesen mintegy 500 ezer tonna ózont bont el mindössze 25 kg jelenlevő klóratom! Az ózonlyuk jelenségének félelmetes sajátossága, hogy váratlanul és hirtelen jelentkezett. Először 1982-ben észlelték brit tudósok földi műszerekkel, 1984 őszén pedig már 8 millió négyzetkilométerre kiterjedő képződmény volt. A klóratom koncentrációja a sztratoszférában az 1930-es évektől kezdve folyamatosan növekedett, az ózonlyuk ennek ellenére csak egy adott klóratom koncentráció fölött, gyakorlatilag egyik évről a másikra hirtelen jelentkezett. Az ózonlyuk jelensége a

⁴⁰ Ez több, mint az észak-amerikai kontinens területe.

modern kor legdrámaibb példája hatalmas természeti rendszerek az emberi tevékenység által akaratlanul előidézett *váratlan* viselkedésének.

Ózonlyuk az Északi-sarkvidék felett?

Felvetődik a kérdés, hogy kialakulhat-e ózonlyuk az Északi-sarkvidék felett is? Noha az ózonlyuk létrehozásához szükséges tározóegyületek itt is ugyanolyan koncentrációban vannak jelen a sztratoszférában, az ugyancsak nélkülözhetetlen *meteorológiai feltételek* többnyire hiányoznak. Az Északi sarkvidék felett a sztratoszféra télen melegebb,⁴¹ a hőmérséklet így ritkán süllyed a kritikus -78 °C alá, és a kontinensek elhelyezkedése miatt a levegőt korbezáró tartós áramlási rendszerek sem alakulnak ki. Ennek ellenére az 1990-es évek óta az Arktisz felett is megfigyelhető volt néhány évben (1996-ban, 2000-ben és 2005-ben) rövidebb ideig tartó és az antarktusznál lényegesen kisebb mértékű ózonzuglás. Míg nem 2011 márciusában egészen váratlanul a szokatlanul hideg és hosszantartó tél hatására az Arktisz felett is kialakult az ózonlyuk. Noha az ózon kémiai bomlásának mértéke a 15–20 km-es magasságtartományban hasonló volt az antarktiszhoz, az ózonlyuk fennállásának időtartama és a tapasztalt ózonkoncentráció csökkenés lényegesen kisebb volt annál. A csökkenést vastagságú ózonzuglás azonban 2011 áprilisában sűrűn lakott közepes szélességek fölé helyeződött át, ami a megnövekedett UV-B sugárzás intenzitása révén fokozott biológiai kockázatot jelentett. Az Arktisz felett az ózonlyuk kialakulásának előrejelzése egyelőre a tudomány számára is megoldhatatlan feladatot jelent.

Ózonvédelem – környezeti sikertörténet

A kedvezőtlen változások és veszélyek ellenére – vagy talán éppen azért – a sztratoszferikus ózon állapotromlásának megakadályozása a

⁴¹ A Föld decemberben van legközelebb a Naphoz.

környezetvédelem, a tudomány és a nemzetközi politika összefogásának mindmáig legnagyobb sikertörténete. Az ózonzóréteg sebezhetőségének tudományos felismerését követően alig másfél évtized alatt (1987-ben) sikerült tető alá hozni az ózonkárosító anyagok gyártását és felhasználását korlátozó Montreali Egyezményt. Az ózonkárosító anyagok kiváltására új – igaz, erősen üvegházhatású – vegyületeket fejlesztettek ki, a freonok gyártása és felhasználása néhány éven belül töredékére csökkent, és jelentős eredményeket értek a használatban lévő ózonkárosító anyagok visszanyerésében és megsemmisítésében is. Az első Montreali Egyezményt további, egyre szigorodó korlátozásokat előíró nemzetközi egyezmények követték (London, Koppenhága, Bécs, Montreal). Ezek eredményeként az ózonkárosító anyagok globális kibocsátása 1,5 millió tonnáról⁴² 2000-re 400 ezer, 2010-re pedig 200 ezer tonnára csökkent, 2030-ban pedig várhatóan a 100 ezer tonnát sem éri el.

Ózonzóréteg – lassú gyógyulás?

Az ózonzóréteg állapotában az ózonkárosító anyagok több száz (esetként több ezer) éves legkörü tartózkodási ideje miatt korántsem lehet ilyen látványos változást tapasztalni. Mindenesetre a 2000-es évek elejére az ózonzóréteg vastagságának csökkenése megállt, és lassú javulás érzékelhető. A modellszámítások szerint a globális ózonzóréteg az évszázad közepe felé kerülhet ismét az 1960-as években mért⁴³ állapotába. Az Antarktisz fölött korai tavasszal erre az évszázad végéig várni kell, míg az északi félgömb mérsékelt égövi területei (így Magyarország) felett az ózonzóréteg természetes vastagsága várhatóan a 2030-as évek végére helyreáll. Az ózonzóréteg helyreállításában az emberiség kezébe játszik az erősödő üvegházhatás, amely a sztratoszférában a felszinnel érintkezésben nem melegedést, hanem hűlést idéz elő és ezáltal az ózon képződésének kedvez, legalábbis a Föld pólusait leszámítva.

⁴² Freon-11 egyenértékben.

⁴³ Nagyjából a természetes állapotnak megfelelő.

Ózonzéreg – elhárított környezeti katasztrófa

Nem kerülhető meg a kérdés, hogy mi lett volna, ha az emberiség nem ismeri fel időben az ózonzéreg károsításának a veszélyét, és az ózonkárosító anyagok gyártását és felhasználását ugyanolyan ütemben növeli, mint bármely más, a civilizáció extenzív fejlődéséhez szükséges energiahordozót vagy nyersanyagot? Ez az eshetőség szerencsére csak modellszámításokból ismert, ezek alapján napjainkra a globális ózonzéreg mintegy 20%-kal lenne ritkább természetes állapotánál. Ezt azt jelentené, hogy mérsékelt égövön az Egyenlítő környékén megszokott intenzitású ultrabolya sugárzás érne bennünket, annak minden következményével együtt.

5.2. fejezet Az üvegházhatású gázok koncentráció változásai

Szén-dioxid a légkörben

A Föld légkörében a legnagyobb koncentrációban előforduló üvegházhatású gáz, amelynek mennyiségét az emberi tevékenység befolyásolni képes, a szén-dioxid. Légköri koncentrációja (pontosabban keverési aránya) éppen 2014 tavaszán haladta meg először a lélektanilag tekinthető 400 ppm (0,04%) értéket, amekkora több mint 7 millió évvel ezelőtt lehetett utoljára! Ahhoz képest, hogy az emberi civilizáció kialakulását és fejlődését a XIX. század közepéig lényegében állandó (280 ppm) szén-dioxid koncentráció kísérte végig, ezt napjainkra 40 %-kal sikerült megnövelni. Ez azért kockázatos, mert a légköri szén-dioxid a Földön a szén természetes körforgásának egyik eleme, ami hatalmas léptékű természeti folyamatokban vesz részt. A Föld légkörében össze-

sen 770 milliárd tonna szén található szén-dioxid formájában. Összehasonlításképpen a Föld jelenleg gazdaságosan kitermelhető ismert kőszén vagyona 870 milliárd tonna.

Szén-dioxid kicserélődése az óceánnal

Az óceánok felszíni rétege (mintegy 50–100 m-es mélységig), amely a szél által történő átkeveredés révén közvetlen kapcsolatban áll a légkörrel, oldott formában hasonló mennyiségű (700 milliárd tonna) szénet tárol. Az évszakok változásával az óceán felszíni vizének hőmérséklete változik. Jól ismert jelenség, hogy a víz alacsonyabb hőmérsékleten több szén-dioxidot képes oldott formában megtartani, mint magasabb hőmérsékleten. Tehát amikor a víz hőmérséklete emelkedik, akkor szén-dioxid kerül az óceán vizéből a légkörbe, amikor pedig lefűl, akkor a légkörből szén-dioxid oldódik vissza a vízbe. A jelenséget egy ásványvizes palackkal is szemléltethetjük: ha jeges vízben tartott palackra léggömböt húzunk, majd meleg vízbe állítjuk, akkor megnő a víz feletti levegőben a szén-dioxid nyomása és a léggömb felfúvódik. Ha ezt követően a palackot jeges vízbe állítjuk és nemi rázogatas mellett ismételtlen lehűtjük, akkor a szén-dioxid visszaoldódik a vízbe, a nyomás lecsökken és a léggömb visszahúzódik eredeti állapotába. Ez a folyamat a Földön az óceánok hatalmas kiterjedése miatt óriási léptékben megy végbe, évente mintegy 90 milliárd tonna szén cserél így gazdát az óceán felszíni rétege és a légkör között. Ez azonban az évszakok periodikus változása miatt egyensúlyi kicserélődési folyamat, azaz a rendszerben tárolt szén-dioxid mennyisége (éppúgy, mint a léggömbbel lezárt ásványvizes palackban) nem változik meg.

Lassú szén-dioxid nyelő – a mélyóceán

Az óceán fő tömegét azonban a mélyóceán teszi ki, amelyben a légkörhöz és az óceán felszíni rétegéhez képest jóval több, mintegy 38 ezer milliárd tonna szén található. Nagy nyomáson és alacsony hőmérsékleten a víz jóval több szén-dioxidot képes oldatban tartani, mint a felszín közelében. A probléma az, hogy a mélyóceán csak nagyon lassú folyamatok révén tart kapcsolatot az óceánok kevert felszíni rétegével, 5 százaléka a légkörrel. A vízben oldott szén-dioxid a felszín közelében beépül a tengeri élőlények (algák, foraminiferák, korallok, kagylók, csigák) mészházába, majd azok elpusztulása után egy részük lesüllyed a mélyóceánba, ahol ismét oldott állapotba kerül. A másik, ugyancsak korlátozott lehetőség az óceán felszíni áramlatok mélybe süllyedése Grönland és az Antarktisz közelében, ahol is a hideg víz sok oldott szén-dioxidot képes a mélybe szállítani. Az óceánok átkeveredésének időszükséglete azonban több ezer év, így a légkörrel való egyensúly beállításához több tízezer évre lenne szükség.

Szénforgalom a légkör és a bioszféra között

A légkör azonban nemcsak az óceán felszíni rétegével folytat intenzív gázcserét, hanem a szárazföldi bioszférával is. A fotoszintézis folyamatában szén-dioxidból és vízből szerves anyag és oxigén keletkezik:



A folyamat ellentettje élő szervezetek esetében a légzés, elpusztult szervezetek esetében pedig a bomlás, amikor is a visszafelé mutató nyíl irányában a szerves anyagból ismételtén szén-dioxid és víz keletkezik. A légkör bioszférával való kölcsönhatása – hasonlóképpen az óceánokkal folytatott gázcseréhez – lényegében *kiszerelődési folyamat*, amelyet ugyancsak az évszakok periodikus váltakozása hajt. Kevesen gondolnak bele, hogy tavasszal, amikor például a fák levelei vagy a mezőgazdasági haszonnövények növekedésnek indulnak, látványos gyarapodásuk (tömegük) jelentős része a légköri szén-dioxid

Fizibe ment bolygó

beépüléséből származik! Ilyenkor az adott félgömbön a légköri szén-dioxid mért koncentrációja mérhetően lecsökken (kb. 7 ppm-mel).

Az emberek légzése mint szennyezőforrás?

A növények egy részét az állatok (és az emberek) elfogyasztják, és légzésük révén a szén-dioxidot visszajuttatják a légkörbe. Az emberiség természetalkító hatásában kételkedő laikusok körében divatos az emberiség által évente kielégzett szén-dioxid mennyiségét önálló szén-dioxid kibocsátó forrásnak tekinteni és más források (például a járművek által kibocsátott) szén-dioxid mennyiségével összevetni. Noha a két mennyiség nagyságrendileg hasonló (kb. 2,5 milliárd tonna szén-dioxid), alapvető különbség van a kettő között. Az ember által kielégzett szén-dioxid a *természetes egyensúlyi kicserélődés* része, a légkörből származik és azonnal oda is kerül vissza, míg a fosszilis energiahordozók elégetése révén a szén-dioxid legalább húszezerszer (!) olyan gyorsan szabadul fel, mint amilyen sebességgel újraképződik. Tehát utóbbi nem egyensúlyi, hanem lényegében egyirányú folyamat.

A bioszféra mint széntározó

A szárazföldi növények fotoszintézise a légkörből évente mintegy 120 milliárd tonna szénét kot meg, és nagyjából ugyanannyit vissza is juttat a légkörbe. Ennek felét a növények és állatok légzése, másik felét a lebomlási folyamatok révén. A szárazföldi bioszféra (az avarral együtt) a légkörrel megegyező, 800 milliárd tonna szénét tárol. A szén fő tömege a tropusai esőerdőkben és a sarkvidékekhez közeli erdőségektben tárolódik. A talajban (a légkör számára nehezen hozzáférhető humusz formájában) további 1800 milliárd tonna szén található. Könnyen beátlátható, hogy ha a szárazföldi bioszféra állapota nem változik, azaz tömege változatlan marad, akkor a fenti egyensúlyi folyamatból sem szén-di-

oxid, sem oxigén többlet sem származik. Ha azonban a szárazföldi bioszférában tárolt szén mennyiségét csökkentjük (például erdőirtás révén), akkor a különbség szén-dioxid formájában a légkörbe kerül.

Szén a Föld mélyében

A légkörtől gyakorlatilag elzárta, a Föld mélyében *üledékes kőzetekben* karbonát és szerves anyag formájában elképzeltelen mennyiségű, 90 ezer billió tonna szén pihen. (A szerves anyag egy csekély része a fosszilis energiahordozóként felhasználható kőszén, kőolaj és földgáz.) Ez a légkörben tárolt mennyiség több mint százezerszerese! Ha ez a hatalmas szénmennyiség egyszerre felszabadulna, akkor a Földnek – a Vénusz bolygóhoz hasonlóan – 38 ezer hPa nyomású szén-dioxid atmoszférája lenne! A földtörténet során eltemetődött szerves anyag légkörben maradt „párja” a légkori oxigén, amikor ugyanis a fotoszintézis során képződött szerves anyag a mélybe került, nem tudott elbomlani, és így elhasználni a vele együtt képződött oxigént, ami a légkörben felhalmozódott. Geológiai folyamatok, mint például a kőzetek mállása, emberi léptékkel mérve elképzeltelenül lassan, évtizedmilliók alatt lennének képesek a légkörön keresztül megforgatni ezt a hatalmas szénmennyiséget.

A vulkánosság mint jelentős szén-dioxid forrás?

Manapság – az emberi szén-dioxid kibocsátás jelentőségét kisebbítendő – a laikusok körében szokás a vulkáni tevékenységet számottevő szén-dioxid forrásként emlegetni. A valóságban vulkánkitörésekből évente csak csekély mennyiségű szén jut a légkörbe (összesen mintegy 100–120 millió tonna), ami nagyjából egyensúlyt tart az évente az üledékekben eltemetődő szén mennyiségével. Az egyetlen kivétel az Etna, amely csomagában mintegy 60–80 millió tonna szenet juttat szén-dioxid formájában évente a légkörbe.

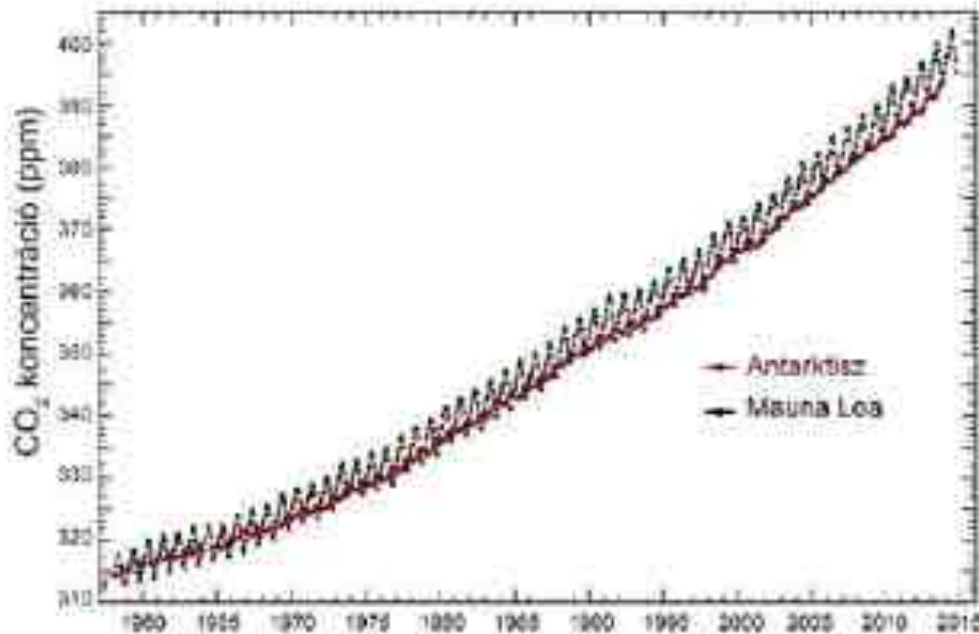
A szén körforgása – az emberi beavatkozás

Adva van tehát a Föld, a maga hatalmas természetes széntározóival és közöttük a szintén hatalmas léptékű kicserélődési folyamatokkal, és az ember, aki ezekben a folyamatokban látszólag csekély, de egyre növekvő mértékben beavatkozik. A beavatkozás fő terepe napjainkban a fosszilis energiahordozók égetése, melynek során a légkörtől elzárt tározókból *nem egyensúlyi folyamatban* évmilliók alatt eltemetődött szén juttatunk a légkörbe. Egyetlen nap leforgása alatt mintegy 20 ezer év (t) alatt eltemetődött energiahordozót termelünk ki és használunk fel. Ezért ez a szénmennyiség a Föld-légkör rendszer gondosan kiegyenlített természetes körforgásában *többet kért* jelentkezik.

Légköri szén-dioxid koncentráció – amire senki nem számított

De menjünk vissza az időben mindössze hatvan évet, amikor a szén természetes körforgásáról és az emberi tevékenység potenciális hatásáról még vajmi keveset tudtunk. Ekkor, az 1950-es évek közepén a fosszilis energiahordozók égetése évente globálisan még „csak” 1 milliárd tonna körüli szén juttatott a légkörbe. Abban az időben a tudomány számára is elképzelhetetlennek tűnt, hogy a szén hatalmas tározói ne tudják eltüntetni ezt a csekélynek tűnő többlet mennyiséget. Charles David Keeling vetette fel először, hogy mégis folyamatosan mérni kellene a légköri szén-dioxid koncentrációját. Otlele nem aratott elismerést, feleslegesen kidobott pénznek gondolták az *állandónak* vélt légkör alkotó folyamatos mérésére fordított dollármilliókat. Végül hosszas küzdelem után Keelingnek sikerült 1958-ban a hawaii Mauna Loa vulkán tetején elindítani a folyamatos szén-dioxid méréseket. A mérések a kezdetektől az évszakos ingadozásokon felül a szén-dioxid koncentráció lassú növekedését mutatták. A mérési eredményeknek azonban *kezdetben nem hittek*, évekig a műszerek pontatlanságára, beállításuk hibára gyanakodtak, és csak az 1960-as évek elejére vált nyilvánvalóvá, hogy a szén-dioxid légköri koncentrációja

– minden előzetes várakozással szemben – valóban növekszik. Ma már a légköri szén-dioxid koncentrációjának folyamatos növekedése mindenki számára elfogadott tény, a mért adatokat bemutató diagram, az ún. *Keeling-görbe* az emberi tevékenység légkörre gyakorolt hatását érzékeltető szimbólummá vált (9. ábra).



9. ábra

A légköri szén-dioxid mért koncentrációja 1958. óta folyamatosan vészett Mauna Loa-i és antarktiszi műszeres mérések eredményei alapján.

Az óceánok többlet szénfelvevő képessége korlátozott

De miért nem tudott a légkör és a vele kapcsolatban álló többi szén-tároló, az óceán és a bioszféra már a légkörbe juttatott többlet szén-dioxid kis mennyiségével sem megbirkózni? Egyfelől az óceánok felszíni rétegének és a bioszféra a szénfelvétele csak korlátozottan, az új egyensúly beállásáig lehetséges. Ezt az óceánok esetében egy nagyon

egyszerű fizikai kísérlettel szemléltethetjük. Vegyünk két szénsavas ásványvizes palackot, nyissuk ki és helyezzük jeges vízbe őket és várjunk, amíg felveszik a víz hőmérsékletét. Az egyikre húzzunk rá egy léggombot, állítsuk meleg vízbe és várjuk meg, amíg a léggomb felfúvódik. Szorítsuk el a léggombot, vegyük le a palackról és húzzuk rá a másik, a jeges vízben tartott palackra. Ezzel többlet szén-dioxidot juttatunk a másik palack és a léggomb együttesébe. Most próbáljuk meg a léggombban tárolt többlet szén-dioxidot az ásványvízben elnyeletni! Ez csak részben fog sikerülni, a szén-dioxid egy része a léggombban marad. Miután a léggomb és az ásványvíz közötti oldódási egyensúly kialakul, több szén-dioxid beoldódása már nem lehetséges.

A fák sem nőnek az égig

Hasonló a helyzet a szárazföldi bioszférával is, a többlet szén felvétele csak az új egyensúlyi állapot eléréséig lehetséges. A növények a számára tápanyagként szolgáló szén-dioxid koncentrációjának növekedése esetén kissé több szén-tudnak szervezetükbe beépíteni – már amennyiben a növekedésükhöz szükséges többi feltétel és minden más tápanyag is a rendelkezésükre áll. Ez a jelenség az ún. *szén-dioxid trógvízis*. Üvegházakban végzett kísérletek során kimutatták, hogy a növények azon családja, amelyekbe a fák többsége is tartozik (az ún. C3 típusú növények), a szén-dioxid koncentráció további növeledése esetén még ideális körülmények között is csak egyre kisebb mértékben képesek tömegük további növelésére, 560 ppm koncentráció felett pedig már egyáltalán nem! A szén-dioxid kibocsátás jelenlegi ütemével számolva ezt a kritikus koncentrációsintet már a század második felében elérjük. A bioszféra többlet szén felvevő képessége – ami a biomasza tömegének gyarapodásához köthető – tehát korlátozott, és jelenlegi ismereteink szerint a jövőben még inkább az lesz.

A bioszféra pusztítása – további többlet szén-dioxid forrás

A szárazföldi bioszféra kiterjedését riadásul az emberi népesség számának és életterének folyamatos növekedése, az élelmiszertermelés és ipari tevékenység bővülése, valamint az ebből adódó környezetpusztítás egyre szűkebb korlátok közé szorítja. Az erdőirtások még napjainkban is minden évben 20–22 millió hektárral⁴⁴ csökkentik a trópusi esőerdők területét. Az elsivatagosodás, a talajpusztulás és a beépítés miatt további hatalmas területek válnak terméketlenné. Az elpusztított növényzet széntartalmának legnagyobb részét néhány éven belül a légkörben szén-dioxid formájában látjuk viszont. Ezt a szén-dioxid mennyiséget – a fosszilis energiahordozók égetéséből származóhoz hasonlóan – a légkör szempontjából többletnek kell tekintünk, hiszen az egyensúlyi raktározására képes növényzetet a felszínen kiirtottuk és újratelepülését megakadályoztuk.

Fékevesztett szén-dioxid kibocsátás

A többlet szén-dioxid kibocsátást illetően az emberi civilizáció egészen a 19. század közepéig szinte elhanyagolható hatást gyakorolt a szén körforgására, majd ezt követően egyre gyorsuló mértékben globális természetalkító tényezővé vált. A fosszilis energiahordozók égetéséből és kisebb mértékben a cementgyártásból kibocsátott szén-dioxid mennyisége 2013-ban 10 milliárd tonnát tett ki. Az emisszió 22 %-kal haladta meg a 2000. évi, az 1990-es kibocsátást pedig 61%-kal múlta felül. A kibocsátás növekedési üteme is gyorsult: az 1990-es évek elején még csak évente 1 %-kal növekedett, 2010 óta már évi 2,5 %-kal bővül. A gyorsuló növekedésnek részben az is oka, hogy a fosszilis energiahordozókon belül napjainkban újra reneszánszt él a kőszén felhasználása. Míg az ezredfordulón a világ energiatermeléséből csak 37 %-ban részesült, 2013-ban már 43 %-kal. A kőolaj 1968 óta tartó vezető szerepe után 2008-ban szorult ismét a második helyre.

⁴⁴ Megközelítőleg Portugália területével.

Tudvalevő, hogy megtermelt teljesítményegységre vetítve a kőszén felhasználása 33%-kal több szén-dioxid kibocsátással jár, mint a kőolaj égetése, és 84 %-kal többel, mint a földgázé.

Globális szén-dioxid emisszió – könyvelési trükkök

Legnagyobb mértékű a szén-dioxid kibocsátás növekedése a fejlődő országokban, különösen Kínában, amely – az Egyesült Államokhoz hasonlóan – a szén-dioxid kibocsátás korlátozására vonatkozó Kiotói Egyezményt (1992) nem is ratifikálta. Nem hagyható említés nélkül azonban, hogy a kibocsátás növekedéséhez, egyben a Kiotói Egyezményben foglalt vállalások megkerüléséhez a globális kereskedelem bővülése, illetve a szennyező iparágak más országokba való áttelepítése is jelentősen hozzájárult. Kínában például a 2002 és 2005 közötti többlet szén-dioxid kibocsátás 50 %-át olyan iparágak használták fel, amelyek termékeit a fejlett országokban értékesítették. Így persze a fejlett országoknak könnyen sikerült a kibocsátás-növekedés mértékét feken tartani. Az Egyesült Államok például 1997 és 2004 között +6%-os kibocsátás-növekedést produkált, míg az importot is figyelembe véve az ugyanerre az időszakra számított bővülés +17%-os lenne.

Atomrobbantások – a szén körforgásának bizonyítékai

A légkör összetételének megváltozásában az emberi tevékenység közvetlen hatását reménytelen vállalkozás lenne vitatni. Olyan *konvenció* kísérleti bizonyítékok állnak a rendelkezésünkre, amelyek alapján nagy megbízhatósággal meghatározható, hogy miből is adódik a szén-dioxid koncentráció folyamatos növekedése. Az egyik legfontosabb bizonyítékot akaratlanul is az 1955 és 1962 közötti kísérleti atomrobbantások szolgáltatták. A légkörben végzett robbantások során felszabaduló hatalmas energia jelentősen megnövelte a levegőben természete-

tes körülmények között csak kis koncentrációban előforduló radioaktív ^{14}C -izotóp mennyiségét, vagyis rövid idő alatt nagy mennyiségű radioaktív szénatomot tartalmazó szén-dioxid került a légkörbe. A légköri keveredés ezt a szén-dioxidot néhány év alatt egyenletesen elosztotta a légkörben, és lehetővé vált annak tanulmányozása, hogy ez a *megjelölt szén-dioxid* milyen útemben és hogyan kerül ki a légkörből.

Más szférák szénfelvevő képessége korlátozott

A mérések azt mutatták, hogy a ^{14}C -izotóp mennyisége kezdetben gyorsan csökkent, majd a csökkenés lelassult és a megjelölt szén-dioxid számottevő része a légkörben maradt. A kezdeti gyors csökkenés a szén-dioxid légkör-óceánfelszín és a légkör-bioszféra közötti gyors, de egyensúlyi kicserélődéséből adódik. Az ezt követő lassú változás már annak tulajdonítható, hogy a fosszilis energiahordozók égetése ^{14}C -izotóp mentes szén-dioxiddal „higítja” a légkörben található szén-dioxidot. Az évmilliókkal ezelőtt képződött fosszilis energiahordozókban azért nem található ^{14}C -izotóp, mert annak felezési ideje csak 5730 év. Ezért például a légkör és az óceánvizben oldott szén-dioxidból, a fák évgyűrűiből és az óceáni élőlények vázából a $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ izotóparány méréseivel megállapítható a fosszilis eredetű szén felhalmozódásának úteme, a légkör és a többi tározó közötti szénkicserélődés mértéke. A mérések szerint napjainkban az emberiség által kibocsátott többlet szén-dioxid 54 %-a hosszú évszázadokig a légkörben marad, míg az óceánok, illetve a szárazföldi bioszféra a fennmaradó 46 %-ot egyelőre el tudja nyelni.

Elhasználjuk az éltető oxigént?

A fosszilis energiahordozók nagy tömegben történő égetése természetesen csökkenti a légköri oxigén szintjét is. A széntartalmú anyagok égése ugyanis oxigént használ fel, és a folyamat a természetben

egyirányú. Korszerű műszerekkel ma már pontosan mérhető a légköri oxigén koncentrációja, pontosabban a nitrogénhez viszonyított aránya. Az 1993 óta végzett mérésekből tudjuk, hogy a légköri oxigén koncentrációja 15 év leforgása alatt 300 milliómódrésszel csökkent. Természetesen a 20,8%-os légköri oxigénszinthez képest ez csekély mértékű változás (-0,03%). Attól egyáltalán nem kell félni, amivel időről-időre riogatnak, hogy a fosszilis energiahordozók elégetésével elhasználjuk a Föld oxigénkészletét. Amikor az utolsó kilogramm kőszént elégetjük, a levegő oxigénszintje mindösszesen 1%-ot csökken. Az oxigénkoncentráció mért csökkenése mindenesetre arra kiválóan alkalmas, hogy általa az izotópos módszertől függetlenül meghatározható legyen a szárazföldi bioszféra és az óceán által felvett szén mennyisége. A bioszférába beépülő szén ugyanis a fotoszintézis folyamatában oxigént termel, ezáltal mérsékelve a fosszilis anyagok elégetésére elhasznált légköri oxigén veszteséget, ami a fosszilis energiahordozók ismert mennyisége alapján pontosan kiszámítható.

A jelen változások a múltbeli koncentrációváltozások tükrében

Fentiek alapján ma már egyértelműen tisztázott, az emberi tevékenység okozza a légköri szén-dioxid koncentrációjának tízezer év óta először tapasztalható gyors növekedését. Ilyenkor a kételkedőknek már csak az az érv marad, hogy a szén-dioxid koncentrációja a földtörténeti múltban is gyorsan és széles határok között változott, akkor még nyilvánvalóan az ember közreműködése nélkül. Ma már az antarktízi kutatóállomásokon mélyített jégfúrásokból a légzárványok összetételének az elemzése révén több mint 800 ezer évre visszamenőleg áll rendelkezésünkre a múltbeli légkör összetételére vonatkozó közvetlen információ. Ebből egyértelműen kiderül, az eljegesedések és a köztes melegebb időszakok váltakozását a szén-dioxid koncentráció széles határok között és gyorsnak tűnő módon követte. A koncentráció azonban ebben a hosszú időszakban egyetlen egyszer sem haladta meg a 310 ppm értéket. Ami a múltbeli koncentrációváltozás *sebességét*

illeti, annak legnagyobb értéke is közel *40-szer lassabb* volt a maián! Míg 120 ezer évvel ezelőtt 50 év alatt 1,5 ppm volt a légköri koncentráció növekménye, addig a legutolsó 50 évben ez 60 ppm! A kutatók egyetértenek abban, hogy legutoljára több mint 7 millió évvel ezelőtt lehetett a Földön 400 ppm a szén-dioxid koncentrációja! A 21. század végére a pesszimista forgatókönyvekben előre jelzett 900 ppm-es szén-dioxid koncentráció pedig utoljára több mint 35 millió évvel ezelőtt fordulhatott elő a Földön, amikor a Föld sarkvidéki területei még jégmentesek voltak.

VI. FEJEZET

A LÉGKÖRI ÖSSZETÉTEL ÉS AZ ÉGHAJLAT KAPCSOLATA

6.1. fejezet Az éghajlatváltozás tényezői

Éghajlatváltozás akkor következik be, amikor a Föld globális energiamérlegének nagyjából állandónak tekinthető (in. kvazistacionárius) egyensúlyát valamilyen külső vagy belső tényező változása megváltoztatja és új egyensúlyi állapot felé mozdítja. Ezeket a tényezőket az ún. *éghajlati kényszer* elemének nevezzük, utalva arra, hogy ezek a tényezők befolyásolni tudják Földünk éghajlatát. Külső tényező lehet csillagászati, például a Föld Nap körüli pályájának periodikus változása; vagy a Nap sugárzasi 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 napisugárzás visszaverő képességének (az ún. *planetáris albedó*) változása vulkánkitörések hatása, a levegőszennyezés vagy az ember felszíni alakító tevékenysége révén. De fontos tényező lehet a hatalmas hőmennyiséget szállító oceáni áramlatok megváltozása is. Az éghajlati kényszer tényezőinek többsége az ember számára láthatatlan (például az üvegházhatás) és hatásuk többnyire igen lassú. Valamennyi tényező

közül kétségtelenül a leglátványosabbak, amelyeknek éghajlatra gyakorolt hatása szinte azonnal jelentkeznek (igaz, csak átmeneti időre), a nagy vulkánkitörések.

Az üvegházhatás

A levegő összetevői között kitüntetett szerep jut a vízgőznek és néhány kis koncentrációban előforduló gáznak, az üvegházhatású gázoknak. Ezek a gázok ugyanis olyan tulajdonságokkal rendelkeznek, amellyel a levegő fő alkotói, a nitrogén és oxigén közül egyik sem képesek elnyelni a Föld felszíne által kibocsátott hosszuhullámú sugárzást. A légkörben mindenütt jelen vannak és kis koncentrációjuk ellenére meghatározó hatást gyakorolnak a Föld sugárzási energiamelegére. Ez az ún. *üvegházhatás*, amely nélkül a Föld felszínén az élet mai formái nem alakulhattak volna ki. Az üvegházhatás tehát nem ember tevékenység eredménye, még csak nem is a Föld bolygó sajátja. Üvegházhatás minden olyan égitesten kialakul, amely meghatározott tulajdonságú légkörrel rendelkezik. A vékony légkörrel rendelkező Marson a Földhöz képest gyenge, a sűrű és szén-dioxidból álló légkörű Vénuszon viszont az üvegházhatás mértéke 150-szerese a földinek. Az üvegházhatás eredménye, hogy a felszín hőmérséklete magasabb, mint azonos tulajdonságú, de üvegházhatású gázok nélküli bolygón lenne. A Mars felszínén az üvegházhatás többlete +5 °C, a Földön +32°C, a Vénuszon pedig +470 °C-ot jelent.

Napsugárzás és hőszugárzás

De mi is az az üvegházhatás? A Naptól érkező energia legnagyobb része a Földre rövidhullámú sugárzás, azaz *látható fény* formájában érkezik. A látható fényt a légkör jórészt átengedi, ezért láthatjuk például – legalábbis felhőtlen időben – a Napot, a Holdat vagy a csillagokat. Úgy is mondhatjuk, hogy a Naptól érkező sugárzás számára a

légkör átlátszó A légkör átlátszósága abban is megnyilvánul, hogy tiszta időben tőlünk nagyon messze fekvő képződményeket is megfigyelhetünk. A beérkező és a légkörön áthatoló sugárzás egy része a felhőről vagy a Föld felszínéről (különösen hó- vagy jégfelszínről) visszaverődik. A sugárzás többi része elnyelődik, felmelegíti a felszínt vagy a felszínen található tárgyakat és *hősugárzás* formájában távozik. Ezt a jelenséget saját bőrünkön vagy napon hagyott sötét tárgyakon könnyen megtapasztalhatjuk. A kibocsátott hősugárzást azonban szemünkkel nem láthatjuk, legfeljebb bőrünkkel érzékelhetjük, vagy meleg felszín fölött a feláramló meleg levegő által keltett fénytörést szabad szemmel is megfigyelhetjük. A kibocsátott sugárzás hullámhossza ugyanis a kibocsátó test hőmérsékletétől függ, a Nap⁴⁵ vagy egy izzó vasdarab látható fényt bocsát ki, addig a testünk vagy egy forró lábos által kibocsátott hősugárzást csak bőrünkkel érzékelhetjük vagy legfeljebb speciális berendezéssel láthatjuk. Ha a Föld felszíne által kibocsátott hősugárzást szemünkkel érzékelni tudnánk, akkor a levegőben csak 300 méternyire lennének képesek ellátni, azaz a levegő egyenletesen tejszerű ködnek látszana.

A sugárzási mérleg egyensúlya

Noha a beeső fény és a kilépő hősugárzás tulajdonságai különböznek, a be- és kilépő sugárzási energia mennyisége azonos, ha felszín vagy az adott tárgy hőmérséklete nem változik. Tehát ha egy napon hagyott sötét tárgy felmelegedett és hőmérséklete tovább már nem változik, akkor környezetével *energiaegyensúlyban* van. Ez azt jelenti, hogy éppen annyi sugárzási energiát nyel el, mint amennyi hősugárzás révén távozik belőle. Ha nem így lenne, akkor hőmérsékletének valamelyik irányban változnia kellene. A Föld felszíni átlaghőmérséklete adott időszakban lényegében állandónak tekinthető, ezért a Földre, mint bolygóra az energiaegyensúly feltétele teljesül. Ha nem lennének a levegőben üvegházhatású gázok, akkor a Föld felszíne $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ -on

⁴⁵ A Nap felszíni hőmérséklete $6000\text{ }^{\circ}\text{C}$.

lerne energiaegyensúlyban, azaz ezen a hőmérsékleten tudná kisugározni pontosan azt az energiameennyiséget, amennyit a Nap sugárzásából elnyel. A kisugárzott energia mennyisége ugyanis a tárgy hőmérsékletétől függ: minél magasabb a hőmérséklet, annál több energiát tud kisugározni az illető tárgy⁴⁶. A világrból nézve a Föld most is átlagosan $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os testként sugároz, azaz energiaegyensúlyban van. De a felszínen szerencsére nem $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$ uralkodik, hanem annál jóval több, átlagosan $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Az üvegházhatású gázok szerepe

Az üvegházhatású gázok ugyanis – elsősorban az alsó légkörben – jelentős részben elnyelik, hővé alakítják, majd újra alacsonyabb hőmérsékleten kisugározzák a Föld felszíne által magasabb hőmérsékleten kisugárzott energiát, azaz megnehezítik a sugárzási energia kijutását a világrbe. Éppúgy, mint ahogy a paplan akadályozza testünk hőjének kijutását a szoba levegőjébe. Ez a jelenség az üvegházhatás. Mivel a felszíni hőmérsékleti sugárzás nem egyetlen hullámhosszon történik, hanem egy széles tartományban, és egyes üvegházhatású gázok sugárzás-elnyelése különböző hullámhosszokon különböző, ez a „paplan” nem egyetlen „vastagságú”. Van ahol vastagabb (például azokon a hullámhosszokon, ahol a vízgőz erősen elnyel), van ahol vékonyabb, és van ahol lyukas. Ez utóbbit *légköri ablakoknak* nevezik, amon keresztül a felszín hősugárzásának egy része akadálytalanul jut a világrbe. Az üvegházhatású gázok elnyelése miatt a Föld által kibocsátott sugárzási energia tehát magasabb levegőrétegekből, átlagosan kb. 6 km-es magasságból az ott uralkodó hőmérsékleti sugárzásként ($-17\text{ }^{\circ}\text{C}$) jut ki a világrbe. Mégpedig pontosan annyit, amennyit lejutott és elnyelődött.

⁴⁶ Ezért tudjuk megfőzni például a forró fűzőlapon a levest.

Az üvegházhatás fizikai analógiája

Az üvegházhatás mechanizmusát a fürdőkád modell segítségével szemléltethetjük. A csapon keresztül befolyó víz a Naptól érkező sugárzási energia, a kissé megnyitott lefolyón keresztül kifolyó víz a Föld által kibocsátott hőszugárzás energiája, a kádban levő víz a felszín-légkör rendszerben felhalmozódó hőmennyiség (vagyis a vízszint a felszíni hőmérséklet). A lefolyó dugója az üvegházhatási gázok, ami akadályozza a víz kifolyását a fürdőkádból. Egyensúlyban, ha a vízszint állandó, a befolyó és elfolyó víz térfogatárama pontosan megegyezik, azaz „energiaegyensúly” van. Ha kissé zárunk a lefolyón, növeljük az üvegházhatási gázok koncentrációját, azaz tovább nehezítjük a víz (energia) kijutását, akkor a vízszint (hőmérséklet) emelkedni kezd. Egészen addig, amíg a magasabb vízszint miatt kialakuló nagyobb hidrosztatikai nyomás a szűkebb lefolyónyíláson nem tudja pontosan azt a térfogatáramot továbbítani, mint amivel a befolyó víz érkezik. Ekkor a vízszint további emelkedése megáll, újból beáll az egyensúly, csak éppen magasabb vízszint (hőmérséklet) mellett. Leegyszerűsítve az üvegházhatás ehhez hasonlóan működik.

A légkör „fűtése”

Az üvegházhatási gázok jelenlétének és sugárzáselnyelésének köszönhetően a Föld minden egyes négyzetméterére állított képzeletbeli levegőoszlopot átlagosan 150 W sugárzási teljesítménnyel „fűt”. A Föld egészére ez $7,5 \times 10^{16}$ W, az emberiség teljes energiatermelésének ötmilliószorosa. Ez a hatalmas energiameennyiség – noha a légkörben termelődik – nemcsak, sőt nem elsősorban a légkört fűti: túlnyomó részét az óceán felszíni rétege nyeli el, amelynek hőelnyelő képessége a légkör hőelnyelő képességének húszszorosa. A légkörben ennek az energiameennyiségnek mindössze 1 %-a marad. Ennek a hatalmas energiameennyiségnek köszönhető, hogy a Föld felszíni átlaghőmérséklete $+32$ °C-kal magasabb, mint ami az üvegházhatási gázok

jelenléte nélkül lenne. A természetes üvegházhatás meghatározó komponensei a vízgőz és a felhők, kisebb részben a többi üvegházhatási gáz. A szén-dioxid mellett üvegházhatási gáz a metán, a dinitrogén-oxid, az ózon, újabban pedig a halogénezett szénhidrogének és a kénhexafluorid. Az üvegházhatás által „termelt” összes energianak 89%-án a vízgőz és a felhők osztoznak, a szén-dioxid az üvegházhatás 7,5%-át, a többi üvegházhatási gáz együttesen mindössze 3,5%-át adja.

Mindennapi üvegházhatás

Az üvegházhatás a laikusok számára mint valami elvont fogalom jelenik meg, azt kevesen tudják, hogy hétköznapi tapasztalataink alapján nagyon is kézzelfogható. Különösen a felhők üvegházhatását lehet a mindennapi életből vett példával szemléltetni. Jól ismert, hogy például egy meleg augusztusi nap után derült időben hajnalra erősen lehül a levegő. Ha azonban az eget éjszaka vastag felhők borítják, akkor hajnalra a levegő jóval kevésbé hül le. A két hajnali hőmérséklet között akár 15 °C is lehet a különbség. Az ok, hogy a felhők – akár egy paplan – a földfelszín által kibocsátott hőszagrást igen hatékonyan a felszín közelében tartják. Az is közismert, hogy a sivatagban a nappal és éjszaka között igen nagy a hőingadozás. A nappal igen forró (akár 50 °C hőmérsékletű) sivatagban hajnalra akár fagypont alá is lehülhet a levegő. Az erős lehűlés oka, hogy a sivatagi levegő rendkívül száraz, nincsenek felhők és a vízgőz egyébként erős üvegházhatása kevésbé tud érvényesülni. Ezekből a tapasztalati példákból közvetlenül is érzékelhetjük az üvegházhatást (vagy annak részleges hiányát).

Légköri szén-dioxid nélküli „jéggolyó” Föld

Noha a felhőzet és a vízgőz üvegházhatásban betöltött szerepe az előbbi példák alapján könnyen belátható, azt megfelelő szintű természeti

szettudományos ismeretek nélkül igen nehéz belátni, hogy a levegőben igen kis koncentrációban jelenlevő (együttes koncentrációjuk alig haladja meg a 0,04 %-ot) üvegházhatású gázok hogyan és miért tudnak ebben a folyamatban érdemi szerepet játszani. Pedig jelentőségük sokkal nagyobb annál, ami csekély légköri mennyiségből következne. Mivel ezek a vizgőtől eltérően hosszú tartózkodási idejű gázok, nélkülözhetetlenek a földi üvegházhatás *stabilizálásában*. Számítógépes modellekben szimulálható, hogy mi történne a Földön, ha a légkörből hirtelen kivonnánk a szén-dioxidot és a többi hosszú tartózkodási idejű üvegházhatású nyomgázt, és csak a vizgőt hagynánk benne. Az eredmény megdöbbentő: a Föld szinte teljes felszínét 20–30 éven (!) belül teljesen elborítaná a jég! Magyarországon az éves középhőmérséklet $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ lenne a mostani $+11\text{ }^{\circ}\text{C}$ helyett. Az ok könnyen belátható: amikor a hőmérséklet csökken, a hidegebb levegő kevesebb vizgőt tud megtartani, ezért csökken az üvegházhatás, tovább csökken a hőmérséklet és így tovább. A több száz éves tartózkodási idejű szén-dioxid koncentrációja viszont a vizgőhöz képest állandó és kevésbé függ a hőmérséklettől, ezért ilyenkor átveszi a vizgőtől az üvegházhatás jelentős részét, amíg a fenti folyamat meg nem fordul és a vizgő üvegházhatása helyre nem áll. A szén-dioxidnak ugyanis földi átlagban azért olyan csekély a részesevése az üvegházhatás energiájából, mert a vizgő jelenléte „elnyomja”. A vizgő és a szén-dioxid molekulák elnyelési hullámhossz tartományai között ugyanis igen nagy az átfedés, és a vizgő jellemzően sokkal nagyobb koncentrációban van jelen.

A szén-dioxid üvegházhatásának kísérleti szemléltetése

Az üvegházhatás szemléletes kifejezés, hiszen azt bárki tapasztalhatja, hogy ha az energis fény formájában bejut egy üvegházba,⁴⁷ ahonnan a hőszállítás kijutása erősen akadályozott, akkor az üvegház

⁴⁷ Vagy például egy autó belsejébe.

belsejében igen magas hőmérséklet is kialakulhat. A kifejezés mégsem egészen szerencsés abban az értelemben, hogy az üvegházban a hőenergia kijutása előtt kézzelfogható fizikai akadály (az üveg) áll. A kis koncentrációban jelenlevő üvegházhatású gázokról pedig elég nehéz elképzelni, hogy a hősugárzás világűrbe jutása előtt bármiféle fizikai akadályt képezzenek. Pedig ez így van, és erről egy végtelenül egyszerű fizikai kísérlettel is megbizonyosodhatunk. Vegyünk két egyforma magas üvegpoharat, vágjunk mindkettőnek az aljába azonos méretű vastag fekete filckorongot. Allítsunk mindkét pohárba átványhoz rögzítve egy-egy laboratóriumi hőmérőt úgy, azok alja a pohár fenekétől azonos, 4 cm-es magasságban legyen. Rögzítsünk a poharak fölé 30 cm-es távolságra egy hagyományos 100 W-os izzóval ellátott íróasztallámpát úgy, hogy mindkét pohárba azonos intenzitású fény-sugárzás jusson. Bekapcsolt lámpa mellett a két hőmérőnek azonos hőmérsékletet kell mutatnia. Ha az egyik pohárba szén-dioxid gázt vezetünk⁴⁸, akkor azt tapasztalhatjuk, hogy a szén-dioxid gázt tartalmazó pohárban a hőmérséklet megemelkedik, és a két pohár között 4–5 °C-os hőmérsékletkülönbség alakul ki. A szén-dioxid tehát képes visszatartani a fekete filckorong által kisugárzott hőenergia egy részét, tehát megbizonyosodhatunk arról, hogy a szén-dioxid üvegházhatású gáz.

A levegőszennyezés hűtő hatása

A Föld-légkör rendszer sugárzási mérlegét nemcsak az üvegházhatású gázok befolyásolják, hanem fontos szerepet játszanak benne a levegőben nagy számban megtalálható aeroszol részecskék is. Ezek a parányi részecskék az üvegházhatású gázoktól eltérően nem a földfelszín által kibocsátott hősugárzással, hanem közvetlenül a Naptól érkező látható fényrel lépnek kölcsönhatásba. A fő kölcsönhatás a fény-szórás, ami miatt szennyezett levegőben a látótávolság lecsökken, illetve a Nap sugárzása még felhőmentes időben is kisebb intenzitással éri el a felszínt. Szennyezett levegőben a részecskék fény-szórása miatt

⁴⁸ Szén-dioxidot ásványvizből is fejleszthetünk ecettel vagy citromsavval.

az ég elveszti ragyogó kék színét, fakónak vagy fehéresnek látjuk. Ilyenkor a részecskék a felszínre irányuló napsugárzás energiájának akár 2 %-át is visszaverhetik a világűr felé. Ez a hatás tehát a Föld-légkör rendszer szempontjából nettó energiavesztéssel jár, tehát éppen ellentétes előjeleli folyamat⁴⁹, mint ami az üvegházhatási gázok jelenlétéből adódik.

Koromrészecskék a légkörben – a napsugárzás közvetlen elnyelése

Az égésből származó, így döntően emberi tevékenységhez (vagy gondatlansághoz) köthető részecskék között akadnak olyanok, amelyek közvetlenül képesek a napsugárzás elnyelésére. Ezek a *koromrészecskék*, amelyek koromfeketék lévén igen hatékonyan nyelik el és alakítják hőenergiává a napsugárzást. Egyetlen gramm levegőbe került koromrészecske egy átlagos magyar háztartás egyhetű (!) energiaszükségletét képes megtermelni. Évi 8 millió tonna kibocsátásának köszönhetően a korom ma már jelentős globális éghajlatalkító tényezővé lépett elő. A koromrészecskék még azt követően is képesek a napsugárzás elnyelésére, miután ülepedtek a légkörből. A hó- vagy jégfelszínre ülepedett korom ugyanis csökkenti a felszín fényvisszaverő képességét, amely így nagyobb mértékben képes elnyelni a sugárzás energiáját és ezáltal gyorsabb lesz az olvadás. Ez a jelenség elsősorban az Északi-sark vidékét, valamint az északi félgömb magashegyi gleccserét fenyegeti.

⁴⁹ A részecskék fényszórásának árnyékoló hatását különösen nagy vulkánkitöréseket követő egy-két évben a történelem során az emberiségnek többször is volt alkalma meg tapasztalnia a felszíni hőmérséklet drasztikus visszaesésében.

A levegőszennyezés felhőzetre gyakorolt hatása

A részecskék még a felhők szerkezetét és színét (napsugárzás visszaverő képességét) is képesek közvetve befolyásolni. A felhőcseppek ugyanis a vizgőz részecskéken történő lecsapódásával (kondenzációjával) keletkeznek. A felhők színe és csapadékképző hajlama a felhőcseppek számától és méretétől függ: minél nagyobb cseppekből áll egy felhő, annál sötétebb lesz és annál könnyebben hullhat belőle csapadék. Szennyezett levegőben több részecskén több, de kisebb felhőcseppekből álló felhők jönnek létre. Minél több és kisebb cseppből áll egy felhő, annál fehérebbnek látjuk, azaz annál nagyobb mértékben képes a napsugárzást visszaverni. Eppen ezért műholdas felvételeken nagy területek fölött jól kivehető a levegőszennyezés felhőzetre gyakorolt hatása. Tehát a részecskék a felhőzet által visszavert napsugárzás hányadát befolyásolják, ezáltal hatással vannak a Föld sugárzási energiamelegére és így az éghajlatra is.

Levegőszennyezés az óceánok felett

Az gondolhatnánk, hogy a hatalmas óceán fölött még napjainkban is annyira tiszta a levegő, mint az ember megjelenése előtt lehetett. Ez azonban nincs így, a levegőszennyezés ma már a Föld legtávolabbi zugába is eljut. Az óceánok különösen nincsenek biztonságban, hiszen a tengerhajózás napjainkban az egyik leginkább környezetszennyező és szabályozatlan emberi tevékenység. Az óceánjárókat hatalmas, két-ütemű dízelmotorok hajtják, teljesítményük akár 70 MW is lehet (egy kisebb hőerőmű teljesítménye). A motorokban jellemzően az üzemanyaggyártás nehézzolaj maradványait égetik el (az ún. bunker oil, inkább kátrányszerű anyag), a kéményeken semmilyen füstgáztisztító berendezés sincs. A nehézzolaj maradványoként tartalmazza 2,7 % ként, 1800-szorosa a gépjárművek üzemanyagára a fejlett országokban előírt határértéknek (15 ppm). A nemzetközi tengerhajózás által kibocsátott kén mennyisége 6,5 millió tonna volt 2000-ben, ami 1/10-ed része a globális kén-

kibocsátásnak. Mindezt annak a fényében kell értelmezni, hogy a tengerhajózás a fosszilis energia felhasználásából csak 3 %-kal részesedik. Az óceánjárók motorjai nemcsak kén-dioxiddal, hanem koromrészecskével, nitrogén-oxidokkal, szén-monoxiddal is szennyeznek hatalmas óceáni területek felett a levegőt.

6.2. fejezet Az éghajlati tényezők szerepe a földtörténeti múltban

6.2.1. fejezet Levegőszennyezés: vulkánkitörések

Nagy vulkánkitörések globális hűtő hatása

A légkörbe kerülő vulkáni hamufelhő szemmel láthatóan árnyékolja a Napot, csökkentve a felszínre jutó napsugárzás intenzitását. Ez a hatás azonban rövid ideig tart és elsősorban a vulkánkitörés környezetében érvényesül, mert a vulkáni hamu részecskéi gyorsan kiülepednek a légkörből. Sokkal nagyobb hatásuk van a vulkánkitörés során kibocsátott gáznemű komponenseknek, főleg a kén-dioxidnak. A vulkánok vizsgolt és szén-dioxidot is kibocsátanak, ezek mennyisége azonban más forrásokhoz képest összehasonlíthatatlanul kevesebb, ezért éghajlati hatásuk nincs. A magaslégrébe juttatott kén-dioxid, amint a felszín közelében a levegőszennyezés által a légkörbe juttatott kén-dioxid nagyobb része is, a sztratoszférában kémiaiilag ellenálló kén-savvá, pontosabban szulfátrészecskékké alakul át. Az alsó légkörrel ellentétben (ahol ez a folyamat néhány óra, legfeljebb 1–2 nap alatt végbemegy), a sztratoszférában a teljes átalakuláshoz több hét vagy hónap szükséges. A különbség fő oka, hogy míg a folyamat a felszín közelében a folyékony vízcseppek közreműködésével zajlik, addig a sztratoszféra rendkívül száraz. Mindközben azonban a sztratoszférában uralkodó áramlások hatékonyan eloszlatják a kén-dioxidot és a belőle képződött szulfátrészecskéket is az

egész sztratoszférában, így a kitörés hatása globálisan érvényesül. A folyamat végén a gáznemű kén-dioxidból 75 % kénsav–25 % víz összetételű, jellemzően 0,2 mikrométer átmérőjű apró cseppek sokasága tölti ki többé-kevésbé egyenletes eloszlásban az alsó sztratoszférát. A kénsav-víz cseppekből álló réteg³⁰ a sztratoszférában szórja és részben visszaveri a napsugárzás egy részét, és különösen napnyugtakor a légkörben látványos fényjelenségeket produkál. Mivel a szulfátréteg által a Föld napsugárzás visszaverő képessége is módosul, a Földre jutó energia mennyisége csökken. Legfontosabb hatásuk a felszín és az alsó légkör hőmérsékletének csökkenése. A hatás azonnali és látványos, a többi tényezővel összehasonlítva a legnagyobb különbség, hogy az éghajlat szempontjából meglehetősen rövid ideig tart. A részecskék többsége 2–4 év elteltével kiulepszik a sztratoszférából és a vulkánkitörés éghajlati hatása is elmúlik.

Múltbeli vulkánkitörések bizonyítékai

A Föld éghajlatára (pontosabban időjárására) érzékelhető hatást a legnagyobb vulkánkitörések képesek csak gyakorolni. Ezeknél ugyanis rövid idő alatt rendkívül nagy mennyiségű kén-dioxid kerül igen nagy magasságokba a sztratoszférába. A Fülöp-szigeteken található Pinatubo vulkán 1991. évi kitörése például a mérések szerint 20 millió tonna kén-dioxidot (a teljes éves globális emberi kibocsátás 1/3-át) juttatott néhány nap alatt mintegy 40–50 km-es magasságba. A múltbeli vulkánkitörések megbízhatónak tekinthető nyilvántartása csak a 19. század közepétől áll rendelkezésünkre, az azt megelőző korok kitörései csak közvetett geológiai bizonyítékok (üledékek, evgyűrűk, jégfúrások) alapján rekonstruálhatók. Antarktisz és Grönland jégében például százezer évekig megőrződik a vulkánkitörések után a felszínre hulló kénsav. Szerencsés módon az éghajlati hatás szempontjából pontosan a kénsav mennyisége lényeges, sokkal inkább, mint

³⁰ Érdekeség, hogy a sztratoszférikus aeroszolnak nevezett kénsav-víz részecskék szinte azonos összetételben a Vénusz bolygó légkörében is megtalálhatók.

magának a kitérésnek a nagysága. Az évgyűrűk vizsgálatából, különösen a magashegységek fái esetében, a vulkánkitörés hatására bekövetkező hirtelen hőmérsékletcsökkenésre lehet következtetni. Szélsőséges esetben, amikor a növekedési időszakban a növényeket súlyos fagykár ér, az évgyűrűk között ún. fagygyűrűk jelennek meg, melyeknek szélességéből és mértékéből a vulkánkitörés hatására lehet következtetni. A kénsav közvetlen mérésével szemben azonban az évgyűrűk csak közvetett bizonyítékot szolgáltatnak a vulkánkitörésekről.

A vulkánkitörések mint az emberi történelem alakítói?

Egyes kutatók feltételezik, hogy különösen nagy szupervulkán kitörések akár eljegesedések elindításában is szerepet játszhatnak. Ez ugyan nem bizonyított, de az elfogadott tény, hogy 74 ezer évvel ezelőtt a Toba szupervulkán kitörése annak idején majdnem kipusztította a természeti hatásoknak kiszolgáltatott, gyarapodó számú emberiséget. A múltbeli vulkánkitörések rekonstrukciója alapján a vulkánkitörések gyakorisága az elmúlt kétezer évben megnövekedett az azt megelőző tízezer évhez képest. Az i. sz. 800 és 1200 közötti ún. *középkori meleg időszak* alatt jóval kevesebb nagy vulkánkitörés nyomát találták meg, mint az ún. *kis jégkorszak* (1400–1900) alatt. Ebből egyes kutatók arra következtettek, hogy az intenzívebb vulkáni tevékenység szerepet játszhatott a hidegebb éghajlat kialakulásában is. A Tambora vulkán 1815-os kitörését például Európában és Észak-Amerikában 1816-ban ún. „nyár nélküli év” követte, amikor a nyári hónapokban több alkalommal is mélyen fagypont alatti hőmérsékleteket regisztráltak. A nagyobb vulkánkitörések még a történelem menetébe is beleszóltak: az izlandi Laki vulkán 1783–84. évi kitörése Európa-szerte évekig tartó lehülést, savasodást és súlyos éhínséget hozott, ami minden bizonnyal közrejátszott a francia forradalom kitörésében is.

Vulkánkitörések és éghajlat kapcsolata napjainkban

A vulkánkitörések és az éghajlat közötti kapcsolat a legújabb korban, az intenzív emberi tevékenység időszakában már sokkal kevésbé egyértelmű. A 20. sz. első felében figyelemre méltóan kevés nagy kitörés történt (Santa Maria 1904 és Katmai 1912), és a globális átlaghőmérséklet 1940-ig folyamatosan emelkedett. A század második felében több nagyobb kitörés is bekövetkezett, de a hőmérséklet növekedése folytatódott, mégpedig a korábbinál jelentősebb ütemben. Az Agung 1963. évi, az El Chichón 1982-es és a 20. sz. legnagyobb vulkánkitörésének számító Pinatubo vulkán 1991. évi kitörése a felmelegedés trendjét csak rövid időre szakította meg. Igaz, nem csekély mértékben a Pinatubo kitörését követő évben a globális átlaghőmérséklet 0,5 °C-kal esett vissza, és a trend csak 1994-re állt ismét helyre.

6.2.2. fejezet Üvegházhatás a földtörténeti múltban

Hirtelen globális felmelegedés 56 millió évvel ezelőtt

Mintegy 56 millió évvel ezelőtt a Föld körülbelül 220 ezer évig tartó igen meleg periódust élt át. Ezt a földtörténeti eseményt – amelyet a geológusok Paleocén-Eocén Hőmérséklet Maximumnak (PETM) neveznek – tekinthetjük a Föld történetében az üvegházhatás-vezérelt éghajlatváltozás legközelebbi példájának. A felmelegedés kezdeti szakasza földtörténeti szempontból rendkívül gyorsan játszódott le, a Föld átlaghőmérséklete kevesebb, mint 10 ezer év leforgása alatt legalább 5 °C-ot emelkedett. A kivételesen meleg időszak 110 ezer évig tartott, majd ezt követően földtörténeti léptékben ugyancsak viszonylag gyorsan, néhány 10 ezer év leforgása alatt a hőmérséklet visszatért a meleg periódust megelőző értékre. A sarkvidék ebben az időszakban jégmentes volt, ezért a jégolvadás és megnövekedett sugárzáselnyelés egymást kölcsönösen felerősítő intenzív melegítő hatása nem tudott érvényesülni. A melegedés hatására a szárazföldöken

valószínűleg megnövekedett az intenzív záporok, zivatarok gyakorisága, amint az ebben az időszakban az üledékbe került nagy mennyiségű agyagásványok jeleznek.

A felmelegedés valószínűsíthető oka: üvegházhatású gázok felszabadulása

A szén izotóparányának hirtelen megváltozásából arra következtethetünk, hogy a felmelegedést hatalmas mennyiségű szén-dioxid felszabadulása okozhatta. Az abból az időszakból származó óceáni üledék összetétele is az óceánfelszín gyors elsavasodására, azaz nagy mennyiségű szén-dioxid beoldódására utal. A szén felszabadulásának mértéke, forrása és helye azonban mindmáig tudományos viták tárgya. Az egyik elmélet szerint az Atlanti-óceán északi medencéjének szétválásakor³¹ meginduló intenzív bazaltvulkáni tevékenység a tengeni üledékből kezdetben hatalmas mennyiségű metánt szabadított fel, ami a légkörben szén-dioxiddá oxidálódott. Tekintettel arra, hogy a metán egy grammja 25-ször erősebb üvegházhatással rendelkezik a szén-dioxid grammjához képest, a vulkáni tevékenység révén felszabaduló metán elindíthatta azokat a folyamatokat, amelyek a PETM kialakulásához, illetve földtörténeti időskálán nem túlságosan hosszú ideig tartó fennmaradásához vezettek. Egy másik magyarázat szerint az Antarktisz fagyott talajának olvadása és a szerves anyag bomlása szabadított fel viszonylag gyorsan jelentős mennyiségű szén-dioxidot. Természetesen nem szükségszerű, hogy a gyors felmelegedésnek csak egyetlen oka legyen: a két folyamat egymás után vagy egymással párhuzamosan is bekövetkezhetett, például az üvegházhatású gázok által beindított felmelegedés a fagyott talaj felolvadásához és további öngerjesztő felmelegedéshez vezetett. A tapasztalt mértékű felmelegedéshez 5–13 billió tonna szénnek kellett kevesebb, mint 10 ezer év alatt a levegőbe jutni. Csak összehasonlítássképpen a hagyományos fosszilis

³¹ Ami 56,1 millió évvel ezelőtt kezdődhetett és 1 millió éven keresztül tartott.

energiahordozók összes becsült készlete éppen 5 billió tonna. Bármennyire is hatalmasak ezek mennyiségek, a szén felszabadulásának maximális uterne azonban legfeljebb 0,3–1,7 milliárd tonna/év lehetett, ami lényegesen kisebb, mint évente az ember által napjainkban a légkörbe juttatott fosszilis szénmennyiség (10 milliárd tonna/év).

A felmelegedés következményei

De milyen körülmények uralkodhattak a Földön az eseményt megelőzően, mennyire hasonlítottak ezek a maiak? A légköri szén-dioxid koncentrációja a maiál (400 ppm) lényegesen nagyobb lehetett (600–1500 ppm), a globális átlaghőmérséklet pedig 4–5 °C-kal lehetett magasabb a maiál. A hatalmas mennyiségű szén gyors felszabadulását követően a szén-dioxid koncentráció 4500–6000 ppm-re emelkedhetett. Milyen következményekkel járt ilyen körülmények között az üvegházhatási gáz koncentráció növekedése által vezérelt éghajlatváltozás? A legnagyobb változást a tenger mikroszkopikus élőlényei közül a bentikus foraminiferák szenvedték el, amelyek közül számos faj kihalt. A kihalás oka a gyorsan emelkedő hőmérséklet lehetett. Más mikroszkopikus tengeri élőlényeket a változások kedvezően érintettek, a trópusi vizekben élő fajok mérsékelt égövi vizekben is elterjedtek. A szárazföldeken a szélsőségesen meleg időszakban számos új emlősfaj jelent meg, köztük az első főemlősök is. A felmelegedés miatt a sarkvidékhez közeli földhidakon keresztül új emlősfajok vándoroltak az észak-amerikai kontinensre. A földtörténet ezt az időszakot az emlősök kirajzásának eseményeként tartja számon. A meleg időszak alatt az emlősök egyedemiek testtömege drasztikusan, majdnem a felére csökkent, majd az időszak elmúltával visszaállt a korábbi jellemző tömegre. Ennek oka a lényegesen magasabb hőmérséklet lehetett. A korabeli növények közül visszaszorultak az örökzöldek, helyettük a száraz szubtrópusi területeken honos babfelek terjedtek el. A növények elterjedés területe is több ezer kilométerrel a sarkvidékek felé tolódott. A trópusi területek átlaghőmérséklete akár 34 °C-ra is emelkedhetett (összehasonlításképpen ma 27 °C). A trópusi esőerdőket a

hőség nem viselte meg, sőt fajgazdagságuk ebben az időszakban nőtt. A hőstressz türéseben valószínűleg a nagy szén-dioxid koncentráció is szerepet játszhatott.

Az analógia korlátai

Az 56 millió évvel ezelőtti földtörténeti esemény a mai éghajlatváltozás tanulságaként is szolgál. Hirtelen jelentős mennyiségű üvegházhatású gáz szabadult fel, és erre a Föld, ahogy az a fizikai törvényekből következik, gyors és jelentős felmelegedéssel és az óceánfelszín elsavasodásával válaszolt. Nem szabad azonban elfelejtenünk, hogy az analógia ezen alapvető változásokon túlmenően korántsem tökéletes. A légkör szén-dioxid koncentrációja és a Föld átlaghőmérséklete manapság az akkorihoz lényegesen alacsonyabb. A sarkokat most jégsapka borítja, ami a felmelegedés utemét olvadásával jelentősen gyorsítani tudja. Ma más a kontinensek elhelyezkedése, az óceáni áramlások rendszere, és még sorolhatnánk az alapvető különbségeket. Más állat- és növényfajok élnek ma a Földön, mint akkoriban. Fontos tényező, hogy a szén légkörbe bocsátásának uteme több mint tízszerese az 56 millió évvel ezelőtinek. Ebből arra következtethetnénk, hogy az emberi tevékenységek következményeként a jövőben sokkal drasztikusabb változásoknak lehetünk majd tanúi. Az is igaz ugyanakkor, hogy a Föld-légkör rendszer működésének részleteit és kölcsönös egymásra hatását csak töredékesen ismerjük, így az előttünk álló változások nehezen jósolhatók. Annyi azonban bizonyos, hogy az elmúlt évtizedekben feltárt földtörténeti példa a változások mértékét és mértékét illetően hosszabb időskálán jelentős mértékű változások *lehetőségét* vetíti előre.

6.23. fejezet Csillagászati tényezők és visszacsatolási folyamatok kombinációja

Jégkorszakok és interglaciálisok az elmúlt kétmillió évben

Az elmúlt kétmillió évet, az ún. földtörténeti negyedidőszakot a nagy eljegesedések és a köztes melegebb időszakok (az ún. interglaciálisok) többé-kevésbé szabályszerű váltakozásai jellemezték. Ennek az időszaknak a második feléből a felszíni hőmérsékletet, illetve a szén-dioxid és a metán koncentrációját Gronlandon és az Antarktuszon mélyített jégfúrások eredményei alapján meglehetősen nagy pontossággal tudjuk rekonstruálni. Az üvegházhatású gázok múltbeli koncentrációját a felszínre hozott jégmintákba zárt levegőbuborékok összetételének elemzésével határozták meg, a hőmérséklet közelítő becslése az oxigén izotóparányának mérésével történt. Az antarktusi Dome Concordia kutatóállomáson mélyített fúrásból származó jégminták elemzési eredményei ma már 800 ezer éves adatsorral szolgálnak. A nagy változások kiváltó oka: a Föld-Nap körüli keringésében szabályszerűen ismétlődve (periodikusan) bekövetkező, csillagászati léptékben kezdetben csekély mértékű változások voltak. Legnagyobb szerepe a Föld keringési pályájának 100 ezer évente történő megváltozásának volt. A 115 ezer évvel ezelőtt kezdődő legutolsó eljegesedést az indította el, hogy a Föld elliptikus keringési pályája kissé módosult, és a Föld-Nap távolság maximuma közelebb (nyaranta) egyre kevesebb sugárzás érte az északi sarkkör vidékét. A változást már négyzetméterenként <1 Watt sugárzási teljesítménycsökkenés is képes lehetett megindítani.

Önerősítő folyamatok – pozitív visszacsatolási mechanizmusok

A csökkenő nyári besugárzás következtében a télen képződött jég egyre később és kevésbé tudott megolvadni, egyre nagyobb területen

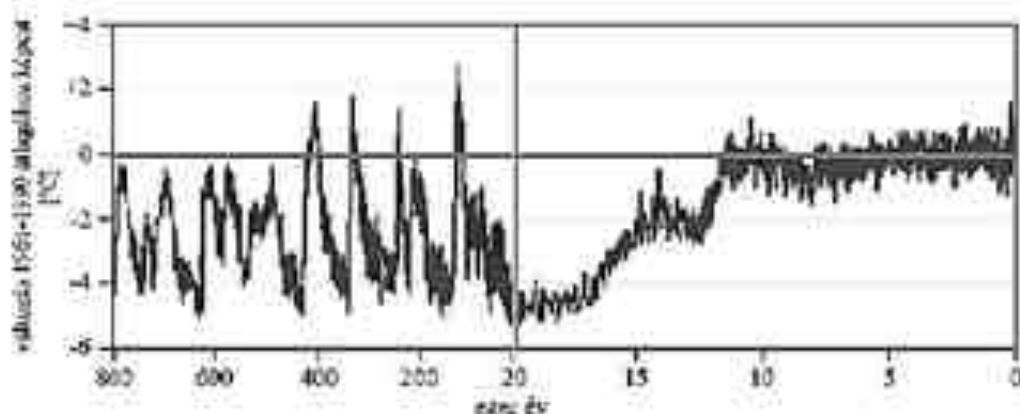
verte vissza a Nap sugárzását, melynek következtében egyre kiterjedtebb régió egyre kevesebb energiához jutott. A hó- és jégfelszín ugyanis rendkívül hatékonyan veri vissza a világról felé a Naptól kis szögben érkező sugárzást. ez a vakító jelenség – ami szélsőséges esetben hóvakságot is okozhat – minden téli sportot kedvelő ember számára ismert. Ha a jég elolvad, és helyette a beérkező napsugárzás a tengerfelszínre ér, arról a fény visszaverődésének hatásfoka lényegesen kisebb, a víz felszínén jóval több fényenergia nyelődik el. Negyzetkilométerenként az elnyelt átlagos többlet teljesítmény 250 MW, azaz egy közepes méretű hőerőmű névleges teljesítménye. Az elnyelt többletenergia hatására a tengerfelszín és a levegő is melegszik, ami hozzájárul a jég gyorsabb olvadásához, további vízfelületek szabaddá válásához és további többletenergia elnyelődéséhez. Ezt az önmagát erősítő folyamatot *pozitív visszacsatolásnak* nevezzük. Az ilyen természetű folyamatok kis kezdeti változást viszonylag rövid idő alatt jelentős mértékben felerősítenek és felgyorsítanak. Tavasszi hóolvadáskor egy verőfényes napon bárki kipróbálhatja, hogy milyen gyorsan olvad sötét felszín közelében a hóréteg. A csökkenő hőmérséklettel a légkörben a vízgőz, a szén-dioxid és a metán koncentrációja is csökken, ami gyengítette a természetes üvegházhatást és további hőmérsékletcsökkenéshez vezetett. A 115 ezer évvel ezelőtti hőmérsékletváltozás azonban hozzávetőleg 300 évvel megelőzte a szén-dioxid és a metán koncentrációjának azonos előjelű változásait. Ezek a megfigyelések összhangban vannak azzal a nézetrel, ami szerint a szén-dioxid és a metán légköri koncentrációjának természetes változásai a jégkorszakok és interglaciálisok ciklusában az éghajlati visszacsatolás elemeként, nem pedig a ciklusok kiváltó okaként szerepeltek.

Drámai éghajlat ingadozások

A folyamatot természetesen a Naptól való távolság további növekedése és az ebből adódó egyre kisebb nyári besugárzás is erősítette, sőt később ennek a hatása lett a legnagyobb. A részben erősítő folyamat végén Európa nagy részét körülbelül az 55. szélességi fokig (a

Fizibe ment bolygó

mai Lengyelország déli határáig) 3–4 kilométer vastag jégtakaró fedte. A hosszú ideig tartó jégkorszakban a mai Magyarország területét tundra borította. 23 ezer évvel ezelőtt a Föld keringési pályájának újbóli változása, a nyári besugárzás intenzitásának újbóli növekedése és az általa megindított ellentétes irányú pozitív visszacsatolási folyamatnak köszönhetően gyors felmelegedés kezdődött. A jégtakaró utolsó maradványai csak mintegy 9 ezer évvel ezelőtt tűntek el teljesen a kontinensekről. Az elmúlt 11 ezer év, a holocén egyelőre ismeretlen okból meghosszabbodott kellemes éghajlatú időszak, ami korábban csak néhányszor és mostanál rövidebb ideig fordult elő az elmúlt 800 ezer év során (lásd 10. ábra). A Föld pályaelemének változásából következően az újabb eljegesedések már több ezer éve meg kellett volna kezdődnie



10. ábra

Az antarktusi jégfúrásból rekonstruált hőmérsékletváltozás az 1961–1990 időszak átlagához képest.

6.3. fejezet Az emberi tevékenység hatása az éghajlatra

A földtörténeti múlt példáiból láttuk, hogy az éghajlati rendszert többé-kevésbé stabil állapotából három tényező valamelyikének megváltozása képes kibillenteni és geológiai időléptékben meglepően gyorsan új, a korábbtól jelentősen különböző állapotába juttatni. Az első a vulkánkitörések által képviselt globális léptékű levegőszennyezés, amely azonnali és jelentős – igaz, egyetlen kitörés esetén viszonylag rövid ideig tartó – hőmérsékletcsökkenést eredményez. A második az üvegházhatású gázok koncentrációjának jelentős mértékű növekedése nyomán bekövetkező felmelegedés, amire a Paleocén-Eocén Hőmérsékleti Maximum szolgáltat földtörténeti példát. A harmadik pedig a sarkvidéken a besugárzás mértékének kismértékű – csillagászati okokból bekövetkező – változása miatt meginduló, onerosító 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 változásokat tud okozni.

6.3.1. fejezet A levegőszennyezés⁵²

A levegőszennyezést az 1990-es évekig inkább lokális, elsősorban a lakosság egészségét érintő problémának vélték, fel sem merült, hogy

⁵² A levegőszennyezés fogalma alatt a hagyományos értelemben, a közvetlenül kibocsátott és a légtérben keletkező szennyezőanyagok, elsősorban aeroszol részecskék által okozott, „látható” levegőszennyezést értem. A széndioxidot és a többi üvegházhatású gázt ebben az értelemben nem tekintem levegőszennyezőnek.

globális éghajlatmódosító tényező is lehet. Pedig a légszennyezés korábban sem korlátozódott a nagyvárosok és iparosodott területek környezetére, hanem a légkörben lejátszódó kémiai folyamatok közvetítésével kontinentális léptekű tényezővé vált. A levegőszennyezés az éghajlat szempontjából meghatározó komponensei az 1 mikrométernél is kisebb aeroszolrészecskék, elsősorban a kén-dioxidból képződő szulfát-, az illékony szénhidrogénekkel képződő szerves és az égésből származó koronrészecskék. Az aeroszolrészecskék látványos és közismert előfordulási formája a füst. Jelenlétük a légkörben az elméleti 330 km-es látótávolságot 15–50 km-re, erősen szennyezett levegőben néhány kilométerre csökkentik.

A levegőszennyezésből származó részecskék éghajlati hatásai

A látható sugárzás és a részecskék kölcsönhatása (szórás, illetve elnyelés) révén csökken a felszínre jutó napsugárzás intenzitása, a világűr felé történő visszaszórás révén pedig sugárzási energia egy része a Föld-légkör rendszer számára elvesz. Ez az aeroszolrészecskék közvetlen éghajlati hatása. A közvetett, azaz a részecskék felhőkre gyakorolt hatását műholdfelvételeken a hajózási útvonalak mentén kirajzolódó fényes felhősávok szemléletesen érzékeltetik. Szennyezett levegőben képződő felhők napsugárzás visszaverő képessége⁵³ megnő, ez is regionális léptékben csökkenti a Föld-légkör rendszerbe jutó sugárzási energia mennyiségét. A légszennyezettség közvetett és közvetlen éghajlati hatásának globális eredője is negatív (hűtő hatás), de a hatás mértéke csak jóval nagyobb bizonytalansággal határozható meg, mint az üvegházhatású gázoké. A mérések és számítások szerint a szulfát- és szerves részecskék globálisan az emberiség teljes energiatermelő kapacitása 40 ezerszeresének (!) megfelelő teljesítménnyel hűtik folyamatosan a légkört, éppúgy, ahogy alkalmanként a nagy vulkánkitörések által a levegőbe juttatott aeroszol részecskék is teszik.

⁵³ Albedója, a visszavert és a beérkező napsugárzás energiájának aránya.

A koromrészecskék éghajlati hatása

A levegőszennyezésből származó korom a levegő egyetlen olyan kémiai alkotója, amely képes a napsugárzás közvetlen elnyelésére. Mégpedig nem is akármilyen hatékonysággal: a légkört melegítő pillanatnyi hatás szempontjából 1 gramm korom 1 tonna szén-dioxiddal egyenértékű. Igaz, a szén-dioxid nem képes a Naptól érkező nagyobb energiájú sugárzás elnyelésére, csak a Föld által kibocsátott kisebb energiájú hősugárzást tudja elnyelni. A felhőzet vagy hó- és jégfelszín felé került koromrészecskék különösen hatékonyak, mert nemcsak a Naptól érkező, hanem a felszínről vagy a felhőkről visszavert sugárzást is elnyelik (ami egyébként a világűrbe jutna vissza). Az elnyelt energia hővé alakul és a légkör melegítésére fordítódik. Annak ellenére, hogy a korom döntően regionális levegőszennyező, közvetlen napsugárzás elnyeléséből számított légköri fűtési teljesítménye globálisan az emberiség teljes energiafelhasználásának 25 ezerszeresét tekintettel arra a tényre, hogy napjainkban a légkörben jelenlévő korom szinte teljes mennyisége a globális emberi tevékenység „mellékterméke”, aligha lehet ezt a hatalmas energiátöbbletet természeti folyamatok nyakába venni.

Bizonyított regionális éghajlatváltozások eredője = globális éghajlatváltozás

A levegőszennyezés éghajlati hatása az üvegházhatású gázokkal szemben nem egyenletesen jelentkezik a Föld felszínén: legnagyobb mértékben erősen szennyezett hatalmas régiókban (pl. Ázsiában), illetve a legérzékenyebb, hóval és jéggel borított területeken (pl. az Arktiszon) érvényesül. A globális átlag ezen regionális extrém hatásokat részben elfedi. Nagymértékű levegőszennyezés esetén a részecskék fényszórása és elnyelése számottevően csökkenti a felszínre jutó napsugárzás intenzitását. Ez az egyébként az 1960-as és 80-as évek között globálisan is kimutatható jelenség a „globális elhomályosodás”

(*global dimming*) néven vált ismertté. Napjainkban ez a jelenség Dél-kelet- és Dél-Azsiában jelentkezik a legsúlyosabb formában, és az ezt előidéző levegőszenyvezés a szakmában új elnevezést is kapott (szuperszmog, lásd 4.1. alfejezet). A felszínre érő napsugárzás intenzitása ilyenkor kontinentális kiterjedésű területeken átlagosan 5–10 %-kal is csökken, a meteorológiai viszonyok a régióban szánottevően megváltoznak. Mivel hatalmas trópusi területeket érintő és hosszantartó jelenségekről van szó, kijelenthető, hogy *együttes hatásuk globálisan jelentőséggel*, azaz a Föld-légtér rendszer energiamérlegét kimutathatóan befolyásolja.

6.3.2. fejezet A többlet üvegházhatás

Ellibázott kommunikációs stratégia

Az 1979-ben Genfben tartott Első Éghajlati Világkonferencia résztvevői számára már világossá vált, hogy a Föld légkörének összetételében jelentős változások következtek be, és az sem volt számukra kétséges, hogy ennek fő oka az emberi tevékenység. Addigra ugyanis a szén-dioxid légköri koncentrációjáról több mint húsz év mérési adatsora állt a rendelkezésre, és a kísérleti atomrobbantásoknak köszönhetően a szén kőforgásának számos elemére is fény derült. A fő kérdést elsősorban a lehetséges következmények számbavétele, illetve a közvélemény figyelmének felkeltése jelentette. Ez utóbbi cél érdekében a szakmát évtizedekre gúzsba kötő, példátlanul rossz döntés született: a választás a légköri változások kizárólagos indikátoraként az üvegházhatású szén-dioxidra és globális átlaghőmérsékletre esett. Azt remélték, hogy e mindenki számára könnyen értelmezhető két mutató látványos és együttes növekedése majd ráirányítja a figyelmet a változások veszélyeire, és felkelti az emberek felelősségérzetét. E várakozásukban csalatkoznuk kellett: már a globális átlaghőmérséklet mérése és számítási módja is sok vitát váltott ki, nem is beszélve arról, hogy éppen az 1980-as éveket megelőző időszakban semmilyen összefüggés

nem mutatkozott az üvegházhatású gázok koncentrációjának növekedése és globális átlaghőmérséklet változása között.

Üvegházhatás kontra levegőszennyezés

Ha annyira fontos szerep jut a légkörben a szén-dioxidnak és a többi nyomgáznak, akkor koncentrációjuk gyors növekedését miért nem követte a 20. században a globális átlaghőmérséklet hasonlóan látványos felfutása? E gázok az emberi tevékenységből származó légköri többlet-mennyiségéből jól ismert elnyelés tulajdonságaik figyelembevételével adott idő alatt a Föld-légkör rendszerben elnyelt többletenergia számítható. Az elmúlt ötven évben az így számított integrált energiátöbblet megfelel 85 ezer évrnyi teljes energiafelhasználásnak a 2008-as szinten. Miért nem bizonyult mégsem jó választásnak a globális átlaghőmérséklet a légköri változások kézzelfogható indikátoraként? Jelentős részben azért nem, mert a szén-dioxid kibocsátással nagyleptékű levegőszennyezés járt együtt: ennek révén hatalmas mennyiségű, a Naptól érkező sugárzási energia veszett el a Föld-légkör rendszer számára. Az elmúlt 50 év során a levegőszennyezés *kompenzáló* hatásának eredményeként a Föld-légkör rendszerbe az üvegházhatás növekedéséből számítható elméleti teljesítménytöbblet mindössze 10%-a jutott! Más szavakkal az elmúlt 50 évben az üvegházhatású gázok többletének éghajlati hatása csak 10%-ban érvényesült.

A 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 környezet-

védelmi előírásokat léptettek életbe. A korszerű levegőtisztaság-védelmi berendezések szinte minden légszennyező anyag hatékony eltávolítására képesek, kivéve a szén-dioxidot. A globális levegőszenyezést ma már inkább a fejlődő országok gyorsan növekvő népessége által nagy számban használt elavult technológiájú járműveknek, illetve az általuk fűtés vagy főzés céljából elégetett biomassa égéstermékének, valamint a kiterjedt szavanna- és erdőégetések kontinensnyi léptékű füstjének tulajdoníthatjuk. A légszennyezettség mérséklődésének „mellékhatásaként” tehát a Föld-légkör rendszerben tárolt energiamennyiség valószínűleg egyre növekvő utamban nőni fog.

A többletenergia megoszlása a Föld-légkör rendszerben

A légkörben az üvegházhatású gázok többletnek elnyelése révén az elmúlt ötven év során képződő többlet energia is bőven elegendő lehetett volna ahhoz, hogy a légkörben napjainkra jól érzékelhető hőmérsékletváltozást idézzon elő. Amde az 1. fejezetben láttuk, hogy a légkör nála sokkal hatalmasabb földi szférákkal intenzív energiacsere-t folytat, azaz a többletenergia más szférákat is melegített. 93%-a az óceánok vízhőmérsékletének emelésére fordítódott, 3–3%-ot pedig a szárazföldek felszíni hőmérsékletének növekedése, illetve a kontinentális és tengeri jég olvadása emésztette fel. A légkör átlaghőmérsékletének emelésére az elmúlt ötven évben a nettó többletenergia alig 1%-a jutott. Ez az energiamennyiség már „csak” 350 évnyi teljes emberi energiafelhasználással egyenértékű – szemben az üvegházhatás módosításából számítható 85 ezer évnnyel. Az elmúlt ötven évben az üvegházhatás és a levegőszenyezés egymással folytatott gigantikus küzdelméből ugyan hajszállal az előbbi került ki győztesen, de a nettó energianyereség a felszíni átlaghőmérséklet mindössze néhány tized fokos növelésére volt csak elegendő. Ez a szélesebb közvélemény számára korántsem bizonyult meggyőző bizonyítéknak a levegő összetételében bekövetkező változások *jövőbeni* jelentőségét illetően.

Van-e üvegházhatású gáz vezérelte éghajlatváltozás?

Felmerülhet a kérdés, hogy a földtörténeti analógia alapján van-e bizonyíték napjainkban az üvegházhatású gázok, döntően a szén-dioxid koncentrációváltozása által vezérelt *azonnali* éghajlatváltozásra? A közvélemény ugyanis az említett elhibázott kommunikációs stratégia miatt kizárólag ezt az egyszerű összefüggést tudná csak befogadni és értelmezni. Az üvegházhatás természetesen működik, a szén-dioxid és más üvegházhatású gázok többlete az alsó légkörben folyamatosan jelentős mennyiségű többletenergiát termel. A növekvő üvegházhatásra *közvetlen* bizonyíték a sztratoszféra hőmérsékletének csökkenése, ugyanis az alsó légkörben dúszuló üvegházhatású gázok „elvezik” a hőszállítás elnyelésének lehetőségét az ozonréteg elől. A párhuzamosan zajló levegőszennyezés kompenzáló hatása miatt azonban ez az energiatermelés igen rossz hatásfokú, ráadásul a megtermelt energiátöbbletet legnagyobb részben más szférák nyelik el. A légkörben és a felszíni hőmérsékletben megfigyelhető eddigi változásokról merészség lenne azt állítani, hogy kizárólag a többlet üvegházhatásnak köszönhetőek. Az üvegházhatás jelentősége természetesen nem vitatható, de az teljességgel kizárható, hogy a szén-dioxid légköri koncentrációja és a globális átlaghőmérséklet között szinkron, illetve egyszerű függvényrel leírható ok-okozati összefüggés legyen.

Mit okozna a levegőszennyezés az üvegházhatású gázok többlete nélkül?

Fordítsuk meg a kérdést, és gondoljuk végig, mi történhetett volna Földünk éghajlatával az elmúlt évszázadokban kibocsátott szén-dioxid és más üvegházhatású gázok *nélkül*, feltéve persze, hogy a levegőszennyezés változatlan formában megtörtént volna? Mivel a levegőszennyezés a vulkánkitörésekhez hasonlóan hűtő hatású, és az üvegházhatású gázok jelentős energiátöbblete a Föld-légkör rendszerből hiányozna, a globális átlaghőmérséklet a manna valószínűleg ér-

zékkelhetően alacsonyabb lenne, még az is elképzelhető, hogy a kis jégkorszak sem ért volna véget. Az sem kizárt, hogy az északi félgömbön erős pozitív visszacsatolási folyamatok indultak volna be, a korábbi eljegesedések kezdeti szakaszaihoz hasonlóan.

Alkalmas-e az üvegház modell a Föld-légkör rendszer viselkedésének szemléltetésére?

Noha a kerti üvegház, mint hasonlat az üvegházhatású gázok közvetlen *légköri* hatásainak szemléltetésére nem túl fenntartással elfogadható, tökéletesen alkalmatlan és félrevezető az éghajlatváltozás hatásainak bemutatására használni. Az üvegházban ugyanis nincs jelen hatalmas mennyiségű víz és jég, mint a Föld-légkör rendszerben. Az üvegházban „előállított” többletenergiát így nincs hova leadni, annak legnagyobb része az üvegház levegőjének melegítésére fordítódik. A Föld-légkör rendszerben ezzel szemben – amint láttuk – a megtermelt többletenergianak csak töredéke jut a levegő hőmérsékletének növelésére. A Föld-légkör rendszer valóságosabb modellje egy hideg vízzel majdnem teljesen megtöltött, jeget is tartalmazó, üveglappal lefedett főzőpohár. Ennek segítségével kísérletileg is könnyen belátható, hogy milyen változásokra számíthatunk, ha a rendszerrel energiát közlünk (például napfénylámpával megvilágítjuk). Valószínűleg keveseknek jutna eszébe a főzőpohárban a víz felett található levegő hőmérsékletét mérni. A megfigyelhető látványosabb változások a jég olvadása és a víz hőmérsékletének lassú növekedése lennének.

A Föld kanárijai⁵⁴: a magashegyi gleccserek

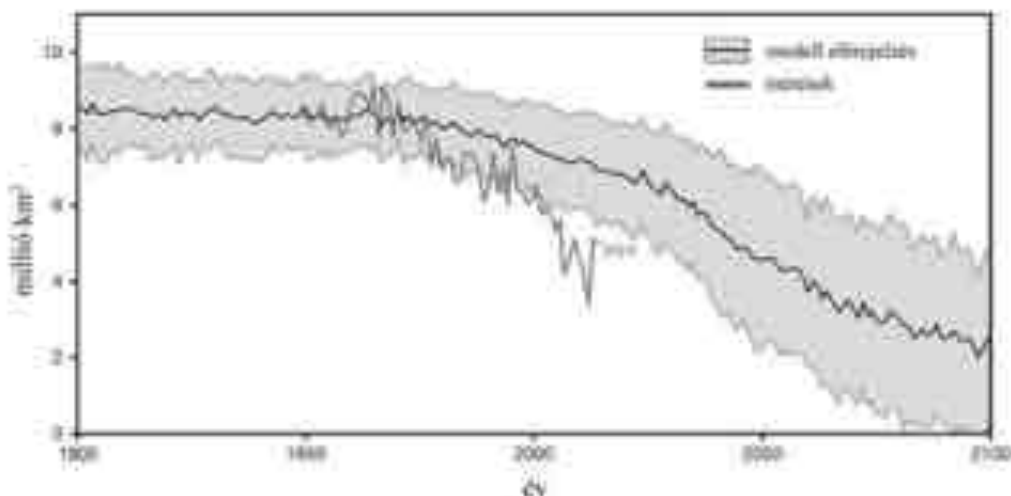
Pontosan ez történik a Föld-légkör rendszerben is. A változásokra a Föld kanárijainak tartott magashegyi gleccserek reagálnak a légérzékenyebben. Rendkívüli sebezhetőségüket a kezdeti hatások felerősítésének képessége eredményezi. Külső hatásból pedig az elmúlt évszázadban jutott bőven az üvegházhatású gázok koncentrációjának növekedése mellett a magashegységekben is számottevően növekedett a levegőszennyezés. A Föld más területeitől eltérően a levegőszennyezés e régiókban hőmérsékletnövekedést okozott, ugyanis a szennyezett levegőben található koronaszecskék nemcsak a beérkező, hanem az erősen tükröző felszín által visszavert sugárzást is el tudták nyelni. Sőt a koronával szennyezett hó- és jégfelszín több sugárzást képes elnyelni a tiszta felszínhez képest, ami felgyorsíthatja az olvadást. Az olvadás következtében szabaddá váló kőzetfelszín még több sugárzást nyel el, így környezetének hőmérséklete tovább emelkedik, még több hó és jég olvad el, és így tovább. Az olvadákvíz lefolyik, pótlására kizárólag csapadékként van lehetőség. A mérések és megfigyelések szerint az északi félgömb magasabb szélességeken fekvő gleccserei az elmúlt 40 év alatt tömegük 15%-át elvesztették, részben a fenti hatások miatt.

A tengerjég állapotváltozásai

Az Arktiszon a mért átlaghőmérséklet-növekedés a globális átlagnak több mint kétszerese. Az Arktisz területén található mérőállomások adatai alapján például 2006-ban az áprilisi átlaghőmérséklet +12 °C-kal (!) haladta meg az éghajlati átlagot. Ezen adatoknál is látványosabb a ten-

⁵⁴ A múltban a szénbányászok elovigyasztalásból kanárikat vittek magukkal a szénbányába. A kanári ugyanis érzékeny a nitrógén összetevőire, a szén-monoxidra és a metánra. Amikor a madár elhallgatott vagy elpusztult, akkor a szénbányászok gyorsan elhagyták a tereket.

gerjég visszahúzódása a nyári időszak végére (kb. szeptember közepére). A tengerjég minimális kiterjedése a műholdas mérések kezdete óta 8,3 millió km²-ről napjainkra 5 millió km² alá csökkent. Legkisebb kiterjedését 2012. különösen meleg nyarán érte el, a tengerjég 2012. szeptember 16-án mindössze 3,41 millió km²-t borított. A tengerjég vastagságából is jelentősen veszített: míg 1980-ban átlagosan 3,6 méter vastag volt, addig 2008-ban már csak 1,9 m (1). Különösen aggasztó, hogy az éghajlati modellek, amelyek a jövőbeni éghajlatváltozás előrejelzésére szolgálnak, még visszamenőleg sem tudják pontosan leírni a jégtakaró állapotváltozásait. Az éghajlati modellek többsége szerint a jég kiterjedésének csökkenése a megfigyelthez képest sokkal lassabb kellene, hogy legyen, a jégtakaró egy részének még ezen évszázad végére is meg kellene maradnia (11. ábra). A műholdas észlelések szerint azonban a nyári jég véresen fogy: egyes kutatok szerint már a 2040-es években elhűnhet nyaranta a tengeri jég az Arktisról.



11. ábra

A tengeri jég minimális (szeptemberi) kiterjedésének változása műholdas megfigyelések adatai és éghajlati modellek szimulációt alapján.

Az óceánok hőmérsékletváltozásai

Amint az a főzőpohár modellben is várható, a többletenergia hatására az óceánok felszíni rétegének hőmérséklete is emelkedik. A mérések alapján bizonyosra vehető, hogy a melegedés az óceán felső 700 m-es rétegét is elérte, sőt nagy területeken 2000 m-es mélységig is leért. A hatás a mélységgel természetesen csökken, a legnagyobb mértékű hőmérséklet-emelkedés a felső 75 m-es rétegben figyelhető meg. Globális átlagban a melegedés mértéke napjainkban $+0,4^{\circ}\text{C}$ az 1971–2010 időszak átlagához képest. Noha ez az érték első pillantásra nem tűnik soknak, az óceánok hatalmas kiterjedését és a tengervíz nagy hőkapacitását figyelembe véve ez azzal egyenértékű, mintha az óceánok vizét 25×25 km-es területenként a paksi atomerőmű egy blokkja teljes kapacitással folyamatosan fűtené³⁵. A melegedés földrajzi eloszlása sem egyenletes, az Atlanti-óceánban nagyobb mértékű volt, mint például a Csendes-óceánon.

A globális átlaghőmérséklet változása

A nagyszámú mérési adat ellenére a levegő-hőmérséklet jelentős ingadozásait és a mérések bizonytalanságát figyelembe véve a globális átlaghőmérséklet meghatározása a legnagyobb bizonytalansággal terhelt. Mégis, a közvélemény ezt az egyetlen mutatót ismeri, és a globális felmelegedés kizárólagos bizonyítékeként ennek a törtélen növekedését várja. A globális átlaghőmérséklet természetesen fizikailag nem létező, hanem mérési adatok milliárdjaiból statisztikailag származtatott mennyiség, amelynek bizonytalanságáról nem szokás szót ejteni. Az átlaghőmérséklet változásának és egyáltalán az éghajlat érzékelhető megváltozásának legfeljebb egy adott földrajzi régióban (például a Kárpát-medencében) lehet jelentősége, különösen évszakok szerinti bontásban. Az éghajlat ugyanis például úgy is jelentősen megváltozhat, hogy a telek lényegesen hidegebbek, a nyarak pedig lényegesen forróbbak lesznek,

³⁵ A hővesztéstől eltekintve

az éves középhőmérséklet mégsem változik. A szélsőséges időjárási események előfordulási gyakorisága is az éghajlat egyik fontos jellemzője, amit az átlagértékek egyáltalán nem tükröznek. A globális átlaghőmérséklet az 1961–1990 időszak átlagához képest $+0,6^{\circ}\text{C}$ -ot emelkedett, de értéke az utolsó 15 évben többé-kevésbé állandósult. Úgy tűnik, hogy az elmúlt időszakban a légkörben termelődő többletenergia a korábbinál nagyobb mértékben az óceánok hőtartalmának növelésére és az északi félgömb állandó jegének csökkentésére fordítódik.

Leállt-e a globális felmelegedés?

Amennyiben az éghajlatváltozás bonyolult kérdéskörét egyetlen paraméter, a legismertebb, ám fizikai jelentéstartalmat nem hordozó globális felszíni átlaghőmérséklet változására szűkítenénk, akkor kijelenthetnénk, hogy a globális felmelegedés folyamata megtorpanni látszik. Azért nem jelenthetjük ki, hogy leállt, mert az éghajlat szempontjából figyelendő legrövidebb időszak (az ún. éghajlati alapskala) hossza 30 év, aminek a globális átlaghőmérséklet állandósulásának kezdete óta még csak a fele telt el. Tehát ha az elkövetkező 15 évben a globális átlaghőmérséklet újra növekedésnek indulna, akkor elhamarkodott megállapításunk érvényét vesztené. Az állandósulás természetesen annyig sem jelenti azt, hogy a fizikailag értelmezhető éghajlati régiókban a mérhető változások leálltak, hanem inkább csak annyit, hogy a regionális változások összessége többé-kevésbé kioltja egymást. Tehát jelenleg is vannak a Földnek olyan régiói, ahol a felszíni hőmérséklet emelkedése az utóbbi 15 évben is töretlen, míg más, nagyobb kiterjedésű, főleg óceáni területek fölött hőmérséklet-csökkenés tapasztalható. Természetesen ha a teljes Föld-légkör éghajlati rendszert tekintjük, akkor ennek a megelőlegezett következtetésnek egyáltalán nincs értelme, ugyanis a felszíni hőmérséklet a rendszer működését tekintve nem is releváns paraméter. A legfontosabb változó a *hőenergiáság*, amelyre az energiamegmaradás tétele vonatkozik. A Föld globális energiamélege alapján 1971 óta folyamatosan

több energiához jut, mint amit a világűr felé kisugároz, azaz lényegében melegszik. Az energiátöbblet folyamatosan növekvő tendenciájában az utolsó 15 évben nem látszik a globális átlaghőmérséklethez hasonló megtorpanás.

6.3.3. fejezet Csillagászati tényezők helyett az ember?

A 6.2.3. alfejezetben láthattuk, hogyan volt képes a besugárzás csillagászati tényezők által előidézett csekély mértékű változása a sarkvidék felől drasztikus éghajlatváltozásokat megindítani a jégtakaró erősítő folyamatai segítségével. Természetesen a Föld pályaelemeit az emberiség nem tudja befolyásolni, de ettől függetlenül a sarkvidéken az elnyelt sugárzás energiáinak mértékét akaratán kívül mégis módosítani tudja. A levegőszennyezésből származó koromrészecskéikkel szennyezett hó- és jégfelszín nap sugárzás visszaverő képessége (ún. albedója) ugyanis a korom koncentrációjától függően jelentősen csökken.

Korommal szennyezett jégfelszín

A legújabb megfigyelések eredményei szerint az Arktisz tengeri jégének és Grönland gleccsereinek átlagos felszíni koromtartalma 10–50 nanogram/gramm, az ebből számított elnyelt többlet teljesítmény négyzetméterenként +0,3 Watt. Ha ehhez hozzávesszük az üvegházhatású gázok koncentrációjának többletéből a régióra számítható elnyelt sugárzás teljesítményt (+0,4 W/m²), ezek együttes összege már megközelíti azt az értéket (<1 W/m²), ami a múltban képes volt jelentős éghajlatváltozásokat megindítani és pozitív visszacsatolási mechanizmusokat aktiválni. Ahhoz kétség sem férhet, hogy manapság az égési folyamatok alapvetően emberi tevékenységhez kötődnek, még a hatalmas erdőtüzeket is – szándékosan vagy gondatlanul – az ember idézi elő. Így a levegőszennyezésen keresztül, alapvető és könnyen belátható fizikai

összefüggések révén az emberiség már napjainkban is közel hasonló mértékű hatást gyakorol a sarkvidék sugárzási energia mérlegére, mint azt korábban a drámai éghajlatváltozásokat *elindító* csillagászati tényezők tettek. Csak éppen lényegesen rövidebb idő alatt. A földtörténeti múltban több száz évre volt szükség hasonló mértékű teljesítményváltozás eléréséhez, mint ami eddig néhány évtized alatt bekövetkezett.

Szuper interglaciális?

Ami azonban példa nélküli az eljegesedések és köztes felmelegedések múltbeli változásában, az a jelenkori változás iránya. Az elmúlt 800 ezer évben a rövid ideig tartó meleg időszakok (interglaciálisok) után *mindig* lehűlés következett. Korábban még nem volt példa arra, hogy egy interglaciális további felmelegedés kövessen (sőt még arra sem, hogy a magasabb hőmérséklet tartósan fennmaradjon, a legutóbbi 11 ezer év, a holocén kivételével) (10. ábra). Ezért ha a megindult változás a jövőben folytatódik, ún. *szuper interglaciális* korszaknak nézünk elébe. A különbség abban is megnyilvánul, hogy míg az elmúlt 800 ezer évben a hőmérsékletingadozásokat az üvegházhatású gázok koncentrációjának változása mintegy 800 év időeltolódással követte, addig napjainkban az üvegházhatású gázok koncentrációjának növekedése *megelőzi* a hőmérséklet emelkedését. A számítások szerint azonban a sarkvidéken tapasztalható, a globális átlagnál jelentősebb mértékű felmelegedést nem elsősorban az üvegházhatású gázok koncentrációjának növekedése okozza. A közvetlen levegőszennyezésből származó koromszemcsék szerepe legalább akkora, ha nem nagyobb, és egyre növekvő mértékben érvényesül a jégfelszín kiterjedésének zsugorodásához és más nagyléptékű kölcsönhatásokhoz köthető, részleteiben kevésbé ismert fizikai visszacsatolási folyamatok hatása is.

Regionális éghajlatmódosításból globális éghajlatváltozás?

Az elmondottak alapján is egyértelműen válaszolhatunk arra a kérdésre, hogy van-e ember által okozott éghajlatváltozás? Igen, minden kétséget kizáróan bizonyítható az emberi tevékenység szerepe a *regionális* éghajlatváltozásban, mégpedig a Föld egy olyan régiójában³⁶, amely a földtörténeti közelmúltban a visszacsatolások révén drámai és ismétlődő globális éghajlatváltozások kiindulási tartományának számított. Ennek alapján arra következtethetünk, hogy az emberi tevékenység jelentős globális éghajlatváltozás elindítója *lehet*. Az analógia azonban korántsem tökéletes, ugyanis a változás iránya és körülményei földtörténeti példák nélkül valók.

6.4. fejezet Epilógus

Az előző alfejezetekben láttuk, hogy az emberi tevékenység a Föld-légkör rendszer sugárzási mérlegének valamennyi elemét – a vizgáz anyagforgalma kivételével – bizonyíthatóan módosította. Az emberiség jelentős mértékben megváltoztatta a földfelszín sugárzáselnyelő képességét az erdőirtás, mezőgazdasági tevékenység, beépítések révén. A levegőszennyezés közvetett hatásaként hatalmas óceáni és szárazföldi területek fölött módosította a felhők szerkezetét és napsugárzás-visszaverő képességét. A levegőszennyezésből származó részecskékkel – a vulkánkitörésekhez hasonlóan – megnövelte a földi légkör árnyékoló hatását, az égésből származó koromrészecskék pedig számottevő mennyiségű napsugárzást nyelnek el. Az üvegházhatású gázok folyamatosan növekvő kibocsátásával megnövelte a légkörben elnyelt hőenergia mennyiségét. Az ózonsztréteg vastagságának csökkenté-

³⁶ Természetesen a Föld számos más régiójában is egyértelműen bizonyítottan tekinthető az emberi tevékenység regionális éghajlatmódosító hatása.

sevel még az alsó légkörbe jutó napsugárzás teljesítményét is módosította. A formális logika szabályai alapján következik, hogy amennyiben egy adott rendszer elemeit megváltoztatjuk, akkor magát a rendszert is megváltoztattuk, ergo bizonyítottuk, hogy az emberi tevékenység *módosítja* a Föld-légkör rendszer sugárzási mérlegét. Mivel pedig a bolygó sugárzási mérlege a Föld-légkör éghajlati rendszer része, a fenti formális logikai gondolatmenet alapján bizonyítottnak tekinthetjük, hogy *az emberiség napjainkban tevékenyen közreműködik a bolygó éghajlatának alakításában*. Ez a következtetés önmagában kévéssé meglepő, hiszen Földünk felszínén kivétel nélkül minden szféra magán viseli a hatalmas léptékű emberi beavatkozások nyomát.

De vajon következik-e ebből, hogy az elmúlt 150 évben bekövetkezett éghajlati változások *minden kétséget kizáróan* az emberi tevékenység hatásának tulajdoníthatók? A teljes bizonyosság ismeretünk hiányosságán felül már csak azért sem érhető el, mert az éghajlati rendszernek a sugárzási mérlegen kívül vannak olyan elemei is, amelyekre az emberi tevékenység jellegénél (például a naptevékenység) vagy nagyságánál (például az óceáni áramlások) fogva *nem lehet közvetlen* hatással. Az is tény, hogy a napjainkig tapasztalható éghajlati változások egyelőre belül maradnak az ismert földtörténeti közelmúlt vagy akár az emberi történelem nyilvánvalóan még természetes eredetű éghajlati ingadozásain. Ez gyakori érv a kételkedők körében, akik a természeti folyamatok fontosságát igyekeznek hangsúlyozni, míg az emberi tevékenységek jelentőségét kisebbíteni vagy éppen tagadni.

Pedig éppen ellenkezőleg, az elmúlt kétmillió év drámai éghajlatváltozásai lelkiismeretünk megnyugtatósa helyett inkább aggodalomra adnának okot. Azt bizonyítják, hogy a sugárzási mérleg kismértékű megváltozásának hatására Földünkön igen könnyen gyors eljegesedés vagy felmelegedés indulhat meg. Más szavakkal az elmúlt kétmillió év nagy éghajlati ingadozásai arra tanítottak meg bennünket, hogy amikor az éghajlati rendszer kibillent adott állapotából, akkor öngerjesztő folyamatai révén még emberi léptékkel mérve is viszonylag gyorsan megszaladt. Azaz bolygónk éghajlati rendszerében – legalábbis évtizedes-évszázados időskálán – nincsenek hatékony fékező-

stabilizáló mechanizmusok²⁷, nincs jól működő földi „termosztát”. Márpedig láttuk, hogy a sugárzási mérleg egyensúlyát az emberiség máris érzékelhetően módosította. Ez az emberiség által indukált vagy inkább kiprovokált jövőbeni éghajlatváltozás legnagyobb kockázata.

Nem feltétlenül a közvetlenül belátható jövőben, az elkövetkező néhány évtizedben fognak jelentős változások bekövetkezni, de nemimeáris nagy rendszereknél a hirtelen változás sem kizárt. A hatalmas Föld-légkör rendszer tehetetlenségéből fakadóan késleltetett hatások valószínűleg a jövő generációjának életlehetőségeit fogják befolyásolni, súlyosbítva a fekteszített gazdaság- és népességnövekedésből eredő, az éghajlatváltozásnál napjainkban jóval fenyegetőbb környezeti problémákat. Mivel az éghajlati rendszer működését csak hézagosan ismerjük, ezért a jövőbeni éghajlatváltozás mértéke és következményei egyelőre tudományos igényvel és felelősséggel megjósolhatatlanok.

²⁷ Negatív visszacsatolási folyamatok

AJÁNLOTT IRODALOM

- Bartholy Judit: Az éghajlat változása – Bizonytalanságok és bizonyosságok. Mindentudas Egyeteme előadás, 2004. szeptember 13. (mindentudas.hu)
- Bozó László, Mészáros Emő, Molnár Ágnes: Levegőkörnyezet – Modellézés és megfigyelés. Akadémiai Kiadó, 2006.
- Czelnai Rudolf: Kellemetlen meglepetések az üvegházban. *Természet Világa*, 1997, 12, 531–533.
- Császár Attila: A földi üvegházhatás. *Természet Világa*, 2009, 2, 140.
- Császár Géza, Haas János, Nádor Annamária: A földtörténeti klímaváltozásai és azok tanulságai. *Magyar Tudomány*, 2008, 6, 663–687.
- Gácsér Vera, Lakatos Mónika, Molnár Ágnes: Változik-e éghajlatunk? *Iskolaküldiro*, 2014, 13–27.
- Gelencsér András, Molnár Ágnes, Imre Kornélia: Az éghajlatváltozás okai és következményei. Pannon Egyetemi Kiadó, 2012. (tankönyvtar.hu)
- Gelencsér András, Molnár Ágnes, Imre Kornélia: Levegőkörnyezet és az emberi tevékenység. Pannon Egyetemi Kiadó, 2012. (tankönyvtar.hu)
- Gelencsér András: Aeroszol részecskék a légkörben. Hűtő hatás? *Természet Világa*, 2004, II. különszám 25–28.
- Gelencsér András: Koronrészecskék a légkörben – a kipufogócsőtől az éghajlatmódosításig. *Magyar Tudomány*, 2014, 11, 1366–1374.

- Gelencsér András: Megszívjuk – A levegőszennyezés és következményei. Mindentudás Egyeteme előadás, 2011. március 1. (mindentudas.hu)
- Geresdi István, Ács Ferenc: Nevezetes visszacsatolások. A lényeg a részletekben. *Természet Világa*, 2004, II. különszám 37–40.
- Gotz Gusztáv: Létezik-e az éghajlati rendszerünknek Achilles-sarka? *Természet Világa*, 2005, 11, 482.
- Haszpra László: Egy adatsor, amely megváltoztatta a világot. *Magyar Tudomány*, 2008, 169, 1359–1365.
- Haszpra László: Uvegházhatás, uvegházgázok. *Természet Világa*, 2004, II. különszám, 21–25.
- Horváth László: Mi a szmog és mi nem az? Egy elhamarkodott szmogriadó-rendelet. *Élet és Tudomány*, 2009, 64, 298–301.
- Horváth László: Savas eső. Gondolat Kiadó, 1986.
- Inre Komélia, Dézsi Viktor, Ferenczi Zita, Gelencsér András: A baj nem jár egyedül – Hóhullámok és levegőszennyezettség. *Iskolakultúra*, 2014, 11–12, 96–102.
- Koppány György: A Föld-légkör rendszer sebezhetősége. *Természet Világa*, 2004, II. különszám, 54–56.
- Mészáros Ernő: A Föld rövid története. Vince Kiadó, Tudomány – Egyetem, 2001.
- Mészáros Ernő: A levegő megismerésének története. MTA Természettudományi Intézete, Természettörténelem, 2008.
- Mészáros Ernő: A természettudományok rövid története. MTA Természettudományi Intézete, Természettörténelem, 2011.
- Mészáros Ernő: Környezettudomány. Akadémiai Kiadó, Akadémiai lexikonok, 2011.
- Molnár Agnes, Gácsi Vera: Szélsőséges éghajlat – szélselyes időjárás. *Iskolakultúra*, 2014, 11–12, 4–12.
- Salma Inre: A légköri aeroszol szerepe a globális éghajlatváltozásban. *Magyar Tudomány*, 2006, 2, 205–211.
- Salma Inre: Tendenciák a városi levegőtisztaság alakulásában. *Magyar Tudomány*, 2010, 3, 288–297.
- Zichler Szilvia, Ocskay Rita, Salma Inre: Budapest levegőszennyeztségének története. Levegő Munkacsoport, 2007 (levego.hu)

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Köszönöm Mészáros Ernő akadémikusnak, hogy két évtizeddel ezelőtt a levegőkémia tudományterületével megismertett, és e könyv kéziratához is hasznos megjegyzéseket fűzött. Molnár Agnes és Pósfai Mihály észrevételei és megjegyzései is a kézirat hasznára váltak, a nyomdai előkészítésben Imre Kornélia és Hofstedterné Jutasi Angelina voltak a segítségemre.

A kutatás a TAMOP-4.2.4.A/2-11-1-2012-0001 azonosító számú Nemzeti Kiválóság Program – Hazai hallgatói, illetve kutatói személyi támogatást biztosító rendszer kidolgozása és működtetése konvergencia program című kiemelt projekt keretében zajlott. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

A könyv kiadását a Magyar Tudományos Akadémia támogatta.

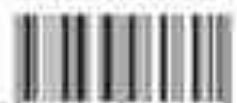


Gellencsér Andás levegőtisztaság- a Felső-
Egységi környezetvédelmi intézetben
egyetemi tanár, az MTA-PE Levegőtisztaság-
Kutatócsoport vezetője. Fő kutatási területe a
széleskörű levegőtisztasági mérési-
működés felügyelete, az ún. légszennyezés
forrásokkal kapcsolatos mérési-
működés, valamint a levegőtisztaság-
védelem szabványosításának felügyelete.
Működésében kiemelt szerepe az a
feladat, hogy a legújabb a levegőt-
isztasági mérési-
működés területein a legújabb
technológiák alkalmazásával a levegőt-
isztaság védelme érdekében a legújabb
technológiák alkalmazásával a levegőt-
isztaság védelme érdekében a legújabb

tehetségét nemcsak a kutatómunkában, hanem a
nemzetközi kutatási pályázatok és egyéb tudományos közlemények terén is. A
széleskörű mérési-
működés felügyelete és a levegőt-
isztaság védelme érdekében a legújabb
technológiák alkalmazásával a levegőt-
isztaság védelme érdekében a legújabb
technológiák alkalmazásával a levegőt-
isztaság védelme érdekében a legújabb

A könyv újabb kiadásban, bővebben tartalmazza a levegőt-
isztaság védelme érdekében a legújabb
technológiák alkalmazásával a levegőt-
isztaság védelme érdekében a legújabb
technológiák alkalmazásával a levegőt-
isztaság védelme érdekében a legújabb
technológiák alkalmazásával a levegőt-
isztaság védelme érdekében a legújabb
technológiák alkalmazásával a levegőt-
isztaság védelme érdekében a legújabb

ISBN 978-963-306-043-1



9 780633 960431

1200 Ft