

Tanulmány

HOGYAN FEDEZTÉK FÖL A LEVEGŐT? ADALÉKOK A LÉGKÖR KUTATÁSÁNAK TÖRTÉNETÉHEZ

Mészáros Ernő

az MTA rendes tagja, egyetemi tanár

Veszprémi Egyetem Föld- és Könyezettudományi Tanszék – meszarosemo@almos.vein.hu

„Az ember megismeréséhez tehát tudnunk kell, mi a magyarázata annak, hogy levegőre van szüksége fennmaradásához; a levegő megismeréséhez pedig azt kell tudnunk, honnan van e kapcsolata az ember életével”.

(Pascal: Gondolatok)¹

A levegő a Föld légkörének elnevezése, amely utal a bolygónkat körülvevő gázburok összetételére. Nevezetesen arra, hogy légkörünk kereken 21 térfogatszázalék oxigénből, 78 % nitrogénből és 1 % egyéb gázból, főleg argonból áll. Ez az egyedi összetétel jelentős mértékben a földi bioszféra (pontosabban a fotoszintetizáló baktériumok, illetve növények) jelenlétének köszönhető. Ugyanakkor a légzésen keresztül meghatározó szerepet játszik az élet, az emberek és az állatok fenntartásában. Levegő nélkül létünk elképzelhetetlen. Percenként mintegy tíz-tizenöt-ször lélegzünk, és egy légzésnél kereken fél liter levegőt szívunk be, illetve fújunk ki. A kilélegzett levegőben 5%-kal alacsonyabb az oxigén koncentrációja. A különbséget szervezetünk anyagcseréjében használja föl.

¹ Pődör László fordítása.

Fontossága ellenére a levegő összetétele csak valamivel több, mint kétszáz éve ismert. Kevés kivételtől eltekintve, csak az utolsó mintegy ötven évben derült ki, hogy a levegő a vízen kívül számos fontos, 1%-nál jóval kisebb arányban előforduló nyomanyagot tartalmaz, amelyek befolyásolják az éghajlatot, valamint a földi és vízi ökoszisztémákba jutó tápanyagok mennyiségét, hogy csak a legfontosabb hatásokat említsük. Jelen tanulmányban a levegő összetételének kutatását próbáljuk történelmi távlatokba helyezve röviden összefoglalni. Megkísérlünk arra az egyszerűnek látszó kérdésre válaszolni, hogy hogyan is fedezték föl a levegőt. Ebből a konkrét célkitűzésből következik, hogy a meteorológia történetének csupán egy speciális részével kívánunk foglalkozni.

Az égbolt: optikai csalódás

A tiszta, porrészecskéktől mentes levegő átlátatlan. A levegőt ezért közvetlenül nem látjuk. Ugyanakkor érzékeljük a levegő egyik fontos optikai hatását, amely abból adódik, hogy a levegőmolekulák szórják a napsugarakat. A 19. század nagy angol fizikusa, *Lord Rayleigh* (1842-1919) 1871-ben mutatta

ki, hogy a molekulák annál jobban szórnak, minél rövidebb a sugárzás hullámhossza. Ebből következik, hogyha felhőmentes időben felnézünk, akkor kék színt látunk. Úgy tűnik, mintha kék színű „kupola” borítaná a Földet. A kupola azonban csak látszólagos, csupán a levegő sugárzásszóró képességének a következménye. Létezik tehát a levegő, de nem létezik az égbolt. Ez utóbbit tulajdonképpen optikai csalódás okozza.

Mindez a kultúrtörténetben elég nagy bonyodalmakhoz vezetett. Így például a mindannyiunk által ismert Bibliában „A teremtsről” szóló részben olvashatunk az égbolt megalkotásáról és szerepéről („Legyen mennyezet a víz között, amely elválassza a vizeket a vizektől”; Mózes I. könyve 1:6), de nincs említés a levegő megteremtéséről. Mindez arra utal, hogy a *Genesis* megfogalmazóinak (néhány száz, esetleg ezer évvel időszámításunk előtt) fogalmuk sem volt arról, hogy a levegő, a földhöz és a vízhez hasonlóan, anyag. Ennek ellenére a Biblia számos történetében a „légkőri” jelenségek fontos szerepet játszanak. Ezek legtöbbször túl sok vagy túl kevés csapadék hullást jelentenek. Gondoljunk a legismertebbekre, Noé történetére („Mert hét nap múlva esőt bocsátok a földre negyven nap és negyven éjjel”; Mózes I. könyve 7:4), illetve az ellenpéldára, az egyiptomi hét csapásra („És íme összeaszott, vékony, keleti szélről kiszáradt gabonafej növekedik vala...”; Mózes I. könyve 41:23). Érthető, hogy abban az időben senkinek sem jutott eszébe, hogy Isten úgy bünteti meg az embereket, hogy csökkenti a levegő mennyiségét, netán oxigénkoncentrációját. A levegő láthatatlanul, de bőszes mennyiségben állt rendelkezésre.

Hasonló nézeteket tükröz például a sumér-babilóniai mitológia. Levegőről itt sincs szó, időjárás jelenségekről annál inkább. Ebben a kultúrkörben nincs egyistenhit. Így az időjárás jelenségeknek külön isten „felelősei” vannak. *Enlil*, az egyik főisten neve

egyenest azt jelenti, hogy a „szelek ura”. *Ada* az „időjárásisten” a villámlásért és a mennydörgésért felelős. Jehovához hasonlóan (Ézsaiás 19:1) a mennydörgés az „időjárásisten” hangja. Végül *Nimurta* a viharfelhők megszemélyesítője, aki a hegyeket esővel öntözi, s az áradásokat szabályozza (lásd Sags, 1999). A közel-keleti kultúrától függetlenül fejlődő kínaiak már időszámításunk előtt 1300-ban meteorológiai méréseket végeztek. Így megfigyelték az ég állapotát, a lehullott hó vastagságát, valamint a szelek irányának változását (La Cotardière, 2004). A levegőről mint anyagról azonban fogalmuk sem volt. Ez a helyzet, mint sok minden, a görög civilizációban változott meg.

Már a régi görögök is

A görögök tisztában voltak a légzés tényével. Ebből arra a következtetésre jutottak, hogy a szél tulajdonképpen az istenek légzéséből származik. Időszámításunk előtt a hatodik században Anaximandrosz (kb. i. e. 610-546) azonban már úgy gondolta, hogy a szél független az istenektől, és egyszerűen a levegő áramlása. Sőt Anaxagorász (kb. i. e. 500-428) arra is rájött, hogy a levegő hő hatására emelkedik, és a felhők azért keletkeznek, mert az emelkedő levegő lehűl (La Cotardière, 2004). Ebből következik, hogy a felszíntől távolodva a levegő hőmérséklete csökken, amit pontos mérésekkel csak a 19. században mutattak ki.

A döntő lépés megtétele a szicíliai *Empedoklész* (i. e. 484-424) nevéhez fűződik, aki először bizonyította tudományos egzaktsággal, hogy a levegő, ez a láthatatlan anyag, valóban létezik. A görög orvos kísérleti eszközt *klepsziudrának* nevezte, amely szó szerint „vízlopót” jelent, de később az idő mérésére „vízóraként” is használták. Az athéni *agora* ásatásakor találtak is ilyen edényeket. A *klepsziudra* lényegében egy rézgömb (lásd Sagan, 1980), amelynek felső része felül nyitott csőben folytatódik. Az alján viszont apró

lyukak helyezkednek el. Ha az eszközt vízbe mártjuk, a gömb megtelik vízzel. Ujjunkkal zárva a cső nyílását a víz a gömbben marad, amikor kiemeljük a folyadékból (ezután a víz a lyukakon meghatározott idő alatt kifolyik, ezért lehet óráként használni). Ha azonban a cső nyílását ujjunkkal már akkor is zárjuk, amikor a gömböt a vízbe helyezzük, akkor nem jut bele víz. Egyszerűen azért, okoskodott helyesen Empedoklész, mert van benne egy anyag, a levegő, amely megakadályozza a víz bejutását (természetesen, ha bemártáskor nem zárjuk a csövet, akkor a levegőt a víz a csövön keresztül kiszorítja a gömbből). Mivel a levegő láthatatlan, nagyon finoman elosztott anyagból kell állnia, vonta le a következtetést a görög gondolkodó. Kísérletével tulajdonképpen azt bizonyította, két évezreddel Evangelista Torricelli előtt (lásd később), hogy a levegőnek nyomása van.

Empedoklész fejtette ki először azt is, hogy az anyagok négy elemből, levegőből, vízből, földből és tűzből állnak. Ezt a gondolatot az időszámításunk előtti negyedik évszázadban *Az égbolt, Meteorológia* és *A keletkezés és pusztulás* című műveiben Arisztotelész (i. e. 384-322) is magáévá tette (bár ötödikként az éter fogalmát is bevezette), sőt hozzájuk tulajdonságokat is rendelt. Így a tűz meleg és száraz, a levegő meleg és nedves, a víz hideg és nedves, míg a föld hideg és száraz. Véleménye szerint mindegyik elem egyik tulajdonsága egy másik elem valamelyik tulajdonságával egyezik. Az elemek úgy alakulnak át egymásba, hogy csupán egyik, nem közös tulajdonságukat kell megváltoztatni. Arisztotelész ismeri fel, hogy a felhők vízből állnak. *Meteorológia* című írásában olvashatjuk, hogy a felhőket „nem tiszta levegő, hanem valamilyen gőz” hozza létre, „amely újra vízzé kondenzálódik”. Így a nagy görög gondolkodót tekinthetjük az egyik legfontosabb légköri nyomanyag, a vízgőz „felfedezőjének”.

A reneszánsz és a felvilágosodás: a felfedezések kora

A középkorban nem nagyon foglalkoztak a levegővel és, az arabokat kivéve, a természettudományokkal is kevesen. Megkerülhetetlen akadályt jelentett, hogy a megfigyelésekhez szükséges eszközök nem álltak rendelkezésre. A legfontosabb műszerek csak a 15-17. században jelentek meg. Ezek lehetővé tették a levegő legfontosabb fizikai tulajdonságainak megfigyelését, de kémiai összetételéről semmit sem árultak el. Így *Leonardo da Vinci* (1452-1519) megszerkesztette az első nedvességmérő műszert (higrométert), amely szárított gyapjúsál hosszának nedvesség miatti megváltozásán alapult (a 20. században hajszálat, pontosabban hajszálköteget használtak erre a célra). *Galileo Galilei* (1564-1642) létrehozta az első hőmérőt, felhasználva, hogy a gázok és folyadékok kiterjedése a hőmérséklet függvénye. Végül *Evangelista Torricelli* (1608-1547) higanyba mártott, felső részén zárt üvegcsővel, a barométer őseivel, megméri a levegő nyomását. Rájön ugyanis, hogy a higany felszínére hat a levegő nyomása, amelynek következtében a csőben a higanyszint a nyomással arányosan megemelkedik. Ezt az elvet használja fel sógora, *Blaise Pascal* javaslatára *Florin Périer* (1605-1647), hogy a Puy de Dome hegyen (Franciaország) végzett mérésekkel bizonyítsa, hogy a légnyomás a magassággal csökken (La Cotardiére, 2004). Nyilvánvalóvá válik, hogy a levegő anyag, amelynek súlya van (a vita inkább azon volt, hogy mi van a csőben a higanyoszlop felett; lásd Simonyi, 1981). Az anyag összetétele azonban ismeretlen maradt, hiszen akkor még a levegőt alkotó kémiai elemeket (vegyületeket) sem ismerték. Ezek felfedezését a kémiai fejlődése csak a 18. században tette lehetővé.

A levegő megismerése szempontjából fontos első kísérlet *Joseph Black* (1728-1799) nevéhez fűződik (Jacobson, 2002). A skót

fizikus 1756-ban magnézium-karbonátot izzított, és megmérte, hogy a hőmérséklet emelkedése közben a magnézium-karbonát veszít a súlyából, és egy nehéz gáz keletkezik, amely nem táplálja a tüzet, ugyanakkor kalcium-oxidnak kitéve a súlyvesztés visszanyerhető. Black úgy okoskodott, hogy a gáz bizonyos vegyületekben kötött formában van jelen, ezért „kötött levegőnek” nevezte el. A gáznak később *Antoine Laurent Lavoisier* (1743-1794) adta a ma is használatos *szén-dioxid* nevet. Érdeemes megjegyezni, hogy Black arra is rájött: szén-dioxid a kilélegzett levegőben is jelen van, következésképpen a levegő egyik alkotója.

A nitrogén felfedezéséhez vezető kísérletet 1772-ben *Daniel Rutherford* (1749-1819) végezte. Ma már kissé megütközünk kísérletén. Zárt térben addig tartott egy állatot, amíg az meg nem dőglött (el nem használta az oxigént), majd a maradék gázt vetette vizsgálat alá (lásd Jacobson, 2002). A gázt később *nitrogénnek* nevezték el (a szó a kálium-nitrát nevéből származik; görögül nitrosz: „lúgsó”). A kísérletből következik, hogy Rutherford tudta, hogy a levegőben létezik egy gáz, amely az állatok életéhez elengedhetetlen. Ez nem is csoda, hiszen erre már száz évvel korábban az ír vegyész, *Robert Boyle* és az angol orvos, *Richard Lower* egyaránt rámutattak. Ennek ellenére, úgy tűnik, Rutherfordot ez az anyag nem különösebben izgatta: nem foglalkozott vele. Így az oxigén felfedezésének dicsőségén másik két vegyész osztozik. A tudománytörténet ugyanígy nem képes eldönteni, hogy melyikük a felfedező.

Azt biztosan tudjuk, hogy az angol *Joseph Priestly* (1733-1804) kísérleteit 1774-ben végezte. Ugyanakkor csak arról van tudomásunk, hogy a svéd *Karl Wilhelm Scheele* (1742-1786) valamikor 1772 és 75 között hajtott végre hasonló kísérletet. Priestly folyékony higanyt égetett el magas hőmérsékleten. Az égetés során fehér por,

higany-oxid keletkezett. Amikor ezt az anyagot vákuumban hevítette, akkor a tüzet tápláló gáz jött létre.² A gázt *oxigénnek* („savcsinálónak”) Lavoisier nevezte el, mivel hibásan úgy gondolta, hogy ezt az elemet minden sav tartalmazza. Priestly azt is kimutatta, hogy a szén elégetése a levegőnek mintegy ötödét fogyasztja el, ami nagyon közel van a ma ismert pontos értékhez. A 18. század végén Lavoisier munkái bizonyították, hogy a maradék négyötödöt nitrogén teszi ki.

Priestly számos olyan anyagot is kimutatót (nem a légkörben!), amelyek a levegőben ugyan csak nyomokban vannak jelen (lásd később), de fontos szerepet játszanak az ott végbemenő kémiai folyamatokban. Így egyebek közt felfedezte a nitrogén-monoxidot, a nitrogén-dioxidot, a dinitrogén-oxidot, a szén-monoxidot, a kén-dioxidot. Érdekességképpen megemlíthjük, hogy politikai nézetei miatt Lavoisier, a modern kémia megalapítóját, a francia forradalom alatt kivégezték. Priestlynek viszont, mivel szimpatizált a francia forradalommal, Angliából menekülnie kellett. Az Amerikai Egyesült Államokban hunyt el.

Összefoglalva megállapíthatjuk, hogy a 18. század végén a levegő felfedezésének nagyon fontos időszaka zárult le. Ebben a században főbb vonásokban megismerték a levegő összetételét, rájöttek, hogy elsősorban nitrogénből és oxigénből áll. A történetnek azonban korántsem volt vége.

A 19. század

A 19. század első felében már-már úgy tűnt, hogy befejeződött a levegő felfedezése. A század második fele azonban bebizonyította, hogy ez egyáltalán nincs így. *Christian*

² A felfedezés összefüggött a hő természetéről folytatott vitával, amelyre itt nem térünk ki (lásd például La Cotardière, 2004). Csúpan megjegyezzük: az oxigén első neve „flogiszton nélküli levegő” volt, mivel Priestly úgy vélte, hogy a kapott gáz flogisztont nem tartalmaz. A flogisztonvitát, mint annyi mást, Lavoisier zárta le, aki először értelmezte helyesen az oxidációt.

Friedrich Schönbein (1779-1868) 1839-ben felfedezte az *ózon*t. A név onnan származik, hogy a német kémikus elektromos kisüléseknél speciális szagot érzett (görög ozein: szag-lani). Majd rájött, hogy a szagot valamilyen gáz okozza. Arra azonban nem jött rá, hogy milyen fontos anyagról van szó. A felfedezés jelentősége akkor vált nyilvánvalóvá, amikor *Walter N. Hartley* (1846-1913) 1881-ben rámutatott, hogy a napsugárzás földfelszínén mérhető spektruma 300 nm alatt azért hiányzik, mivel az ultraibolya sugárzást az ózon elnyeli. Az már csak a 20. század elején derült ki (Wareneck, 1999), hogy az ózonomolekulák többsége nem a talajközeli levegőben található. Érdekes, hogy az ehhez szükséges méréseket Lord Rayleigh fia, *Robert John Strutt* (1875-1947) végezte el.³

A 19. század második felében fedezték fel a nemesgázokat is. A levegőben legnagyobb koncentrációban előforduló *argon* felfedezése a már említett Lord Rayleigh nevéhez fűződik. Abból indult ki, hogy az oxigéntől megtisztított légköri nitrogéngáz 0,5 %-kal nehezebb, mint a kémiai úton előállított tiszta nitrogén. Munkatársával, *Sir William Ramsay*-vel (1852-1916) megállapította, hogy a különbséget egy további gáz jelenléte okozza, amelyet argonnak neveztek el (görög argos: lusta, rest), utalva a gáz kémiaiilag inert tulajdonságára. Azt is sikerült kimutatniuk, hogy az argon a kálium radioaktív bomlása⁴ útján keletkezik. Később felfedezésükért Nobel-díjban részesültek.

A levegő fontos tulajdonsága, hogy nemcsak gázokat, hanem finoman elosztott szilárd és cseppfolyós, ún. *aeroszol részecskéket* is tartalmaz. Ezek a részecskék jóval nagyobbak, mint a levegőmolekulák, ugyanakkor, kivéve a legnagyobb porszemeket, kisebb-

bek annál, hogy szemünkkel egyenként lássuk őket (lásd később). Együttesen mégis érzékelhetők, mivel szórják és elnyelik a fényt, így meghatározzák a látótávolságot, vagyis azt a távolságot, ameddig a levegőben ellátunk. A levegőnek ezt a tulajdonságát is a 19. század második felében kezdték tanulmányozni.

Bár hasonló kísérleteket a francia *Paul Coulier* (1824-1890) korábban végzett, az irodalomban elsősorban az angol *John Aitken* (1839-1919) idézik, mint az aeroszolmérések megindítóját (az aeroszol szó a 20. század terméke, így ezt a kifejezést Aitken nem használja, egyszerűen porról beszél). Aitken 1880-ban megjelent tanulmányában leírja azokat a vizsgálatait, amelyeket ún. tágítási kamrákkal végzett (Aitken, 1880). Ha a kamrába szívott megnedvesített levegőt hirtelen kitágította, akkor a levegőben túltelítettség, következtésként köd keletkezett, amelynek cseppei a kamra aljára rakódtak. Ha a tágítást többször megismételte, akkor már nem keletkezett köd, mivel a levegőből eltűnt a „por”: a cseppekkel együtt a kamrából kiüledett. Aitken ebből helyesen azt a következtetést vonta le, hogy a köd és felhőcseppek porrészecskéken, *kondenzációs magvakon* keletkeznek. Idézett munkájában megjegyzi, „...ha nem lenne por a levegőben, akkor nem lennének ködök és felhők, és valószínűleg eső sem”. Ez az első olyan közlemény, amely világosan kimondja, hogy a felhő- és csapadékkeletkezéshez nemcsak vízgőz és légköri feláramlás, hanem kondenzációs magvak jelenléte is szükséges. Ez a megállapítás volt a kezdete azoknak a kutatásoknak, amelyeket a 20. században végeztek.

A 20. század: nyomgázok

Ha a vízgőztől eltekintünk, akkor a nyomgázok a levegő térfogatának kevesebb, mint 0,04 %-át alkotják. Ennek a hányadnak túlnyomó részét szén-dioxid teszi ki. Kis koncentrációjuk ellenére fontos szerepet játszanak a légköri

³ Lord Rayleigh eredeti családneve Strutt volt. John William Strutt apja halálakor, 1873-ban örökölte meg a lordságot.

⁴ Ebben a cikkben a levegő radioaktív és elektromos tulajdonságaival nem foglalkozunk.

sugárzásátvitel, következésképpen az éghajlat szabályozásában. Meghatározzák továbbá a levegőben lejátszódó kémiai folyamatokat, valamint, a felszínre ülepedve, befolyásolják a talaj, illetve a szárazföldi és vízi ökoszisztémák állapotát. Felfedezésük szorosan kötődik az analitikai kémiai 20. században végbement látványos fejlődéséhez, illetve ahhoz az igényhez, hogy az ember által kibocsátott szennyezőanyagok légköri sorsát és hatásait megismerjük. A nyomanyagok száma ma már olyan nagy, hogy vizsgálatukkal külön tudományág, a *levegőkémia* foglalkozik (lásd például Warneck, 1999, vagy magyarul Mészáros, 1997). Ebben a tanulmányban így szubjektív módon csak néhány fontos felfedezést emelünk ki. Ezek a felfedezések már nem okvetlenül egy-egy vegyület, hanem valamilyen kémiai mechanizmus megismerését tették lehetővé.

Éghajlati hatásukat tekintve a nyomgázok közül kiemelkednek az *üvegházhatású gázok*, amelyek a napsugárzást átengedik, míg a Föld által kisugárzott hősugárzást elnyelik. Koncentrációjuk így szoros kapcsolatban van a hőmérséklet alakulásával. Üvegházhatás nélkül a Föld átlagos hőmérséklete $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ volna, szemben a tényleges $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ értékkel. Az üvegházhatású gázok tartózkodási ideje tíz, esetleg száz év, így a légkörben viszonylag egyenletesen keverednek el. Koncentrációjuk ezért kevésbé változékony. A koncentrációt is figyelembe véve a legfontosabb üvegházhatású gáz a szén-dioxid, amelynek mérését már a 19. században elkezdték, de megbízható módszer csak 1958-tól áll rendelkezésre (Keeling, 1960). Az eljárás a szén-dioxid infravörös elnyelésén alapul. A szén-dioxid koncentrációja a levegőben az emberi tevékenység miatt növekszik. A jelenlegi átlagérték 370 mmol/mol . A légköri metánt először *Marcel V. Migeotte* azonosította 1948-ban a napsugárzás infravörös tartományában található abszorpciós sávok alapján (Migeotte egyébként a légköri

szén-monoxidot is először azonosította; lásd Junge, 1963). Ma már a levegő metánkoncentrációját gázkromatográfiai módszerekkel rendszeresen mérik. Koncentrációja évente közel 1 %-kal növekszik. A jelenlegi koncentráció mintegy $1,7\text{--}1,8\text{ mmol/mol}$. A dinitrogén-oxidot ugyancsak a napsugárzás spektrumában lévő abszorpciós sávok alapján mutatták ki (Junge, 1963). Mérése ma már szintén gázkromatográfiai eljárással történik. Közepes koncentrációja $0,31\text{ mmol/mol}$, amely évente 0,25 %-kal emelkedik.

A 20. században születik meg a levegőkémia, a nyomanyagok tudománya. A nyomanyagok kémiája nagymértékben összefügg a légköri ózon mennyiségével. A 20. század így az *ózonkutatás* évszázada. Egyrészt megszületnek a magasléggöri (sztratoszferikus⁵) ózonkeletkezést és bomlást leíró mechanizmusok, másrészt a mérések kimutatják, hogy ózon a talajközeli levegőben is keletkezik. A troposzferikus ózon szerepet játszik az oxigéntartalmú szabad gyökök⁶ létrejöttében, amelyek a kémiai reakciókat szabályozzák. Végül kiderült, hogy mind a sztratoszférában, mind a troposzférában az emberi tevékenység hatással van az ózon ciklusára. A halálos ultraibolya (UV) sugarakat elnyelő magasléggöri ózon („jó ózon”) mennyiségét csökkenti, a talajközeli, az emberi egészségre, a növényzetre és a műtárgyakra veszélyes talajközeli ózon („rossz ózon”) mennyiségét növeli.

A *magasléggöri ózon* keletkezésének és bomlásának leírására elsőként az angol *Sidney Chapman* (1888-1970) tett javaslatot 5 Magasléggörön a továbbiakban a sztratoszférát értjük, amely a légkör 15–55 km közötti rétege. Benne található a légköri ózonn molekulák kb. 90 %-a. Ebben a tartományban a hőmérséklet a magassággal kissé emelkedik az ózon UV-sugárzást elnyelő hatása miatt. Alatta helyezkedik el a troposzféra, amelyben a magassággal a hőmérséklet általában csökken, mivel a

(Chapman, 1930). Ennek lényege, hogy az ózon keletkezéséhez szükséges atomos oxigén a molekuláris oxigén fotokémiai bomlása útján keletkezik, amely a két oxigént tartalmazó oxigénmolekulával három oxigén-atomból álló ózont képez. Másrészt az ózonkeletkezésben és bomlásban csak az oxigén módosulatai vesznek részt. A második világháború után a kémiai folyamatok sebességével foglalkozó reakciókinetikai vizsgálatok egyre pontosabbá váltak. Az új eredmények világossá tették, hogy a sztratoszferikus ózon bomlását nem lehet a Chapman-féle mechanizmussal megmagyarázni: a bomlás túl lassú. Következésképpen valamilyen nyomanyag még részt vesz az ózon kivonásában. Ez az anyag csak a troposzférából származhat, mivel a sztratoszférában az UV-sugarak hatására a legtöbb vegyület/gyök gyorsan elbomlik. Ebből az is következik, hogy az illető nyomanyagnak valamilyen körfolyamatot kell megindítania, amiben állandóan újrameletkezik. A holland-német származású, de számos országban tevékenykedő *Paul Crutzen* (szül. 1933) mutatott rá elsőnek, hogy a keresett anyag a nitrogén-monoxid, amely a talajból a levegőbe kerülő dinitrogén-oxid bomlásából származik (Crutzen, 1970). A dinitrogén-oxid a troposzférában kémiaiilag inert, így lassú diffúzióval a sztratoszférába jut, ahol az UV-sugarak hatására elbomlik. Ez az elképzelés felvetette annak lehetőségét, hogy a sztratoszférában reptülő szuperszonikus repülőgépek nitrogén-oxid kibocsátása csökkentheti az ózon mennyiségét. Figyelembe véve azonban a szuperszonikus gépek repülési gyakoriságát, valamint a talajból származó dinitrogén-oxid mennyiségét, a számítások nem túlságosan jelentős hatást jeleztek.

A kutatás iránya ekkor váratlan fordulatot vett, mivel *James Lovelock* (szül. 1919) a Gaia elmélet megalkotója (lásd később) az általa feltalált kromatográfiás érzékelővel elvégezte az első légköri *freonméréseket* (lásd Warneck,

1999). A mérésekből kiderült, hogy a légkörbe bocsátott, kémiaiilag teljesen inertnek vélt freon mennyiségének kb. a fele eltűnt a levegőből. Hová lett ez a jelentős freonmennyiség? A kérdés megválaszolásához tudnunk kell, hogy freonokat (kémiai nevükön halogénezett szénhidrogéneket) a 20. század húszas éveinek végén *Thomas J. Midgley* (1889-1944) állított elő először. Midgley amerikai mérnök volt, aki előzőleg az ólmozott benzint is feltalálta (lásd Jacobson, 2002). A freonokat szórópalackokban vivőanyagként, hűtőgépekben hűtőfolyadékként kívánták alkalmazni. Ezek az anyagok a célnak jól megfeleltek, előállításuk nem került sokba. A gondos kísérletek továbbá kimutatták, hogy vízben nem oldódnak, nem gyulladnak meg, és kémiaiilag teljesen inertek. Így egyre többet gyártottak és használtak fel belőlük, következképpen egyre több olyan anyag került a levegőbe, amely ott természetes körülmények között nem fordul elő. Légköri koncentrációjuk követésére azonban nem voltak megfelelően érzékeny analitikai módszerek. Mikor aztán sikerült ilyen módszereket kitalálni, a mérések igencsak meglepő eredményekre vezettek.

A probléma felkeltette a neves kaliforniai vegyész, *Frank Sherwood Rowland* (szül. 1927) figyelmét, aki addig a levegővel egyáltalán nem foglalkozott. Asszisztensével, a mexikói származású *Mario José Molinával* (szül. 1943) úgy gondolták, hogy a freonok talán sztratoszferikus körülmények között bomlanak el, ahol megfelelő hullámhosszú napsugárzás áll rendelkezésre. A kísérletek mindenben igazolták elképzeléseiket (Molina – Rowland, 1974). A freonok az UV-sugárzás hatására elbomlanak, és a keletkező klór az ózonnal gyorsan reakcióba lép. A reakció körfolyamatot indít el, amely az ózon jelentős részét kivonja a levegőből. Tanulmányuk közlésének idején nem tudták, hogy a folyamat emberi beavatkozás nélkül is lejátszódik. Aztán rövidesen kiderült (lásd

Wameck, 1999), hogy a levegő az óceánokból származó metil-kloridot tartalmaz, amely a freonokhoz hasonló szerepet játszik el.

A freonok hatása akkor vált teljesen bizonyossá, amikor angol kutatók felfedezték az antarktiszi tavaszi ózonlyukat (Farman et al., 1985). A talajról végzett spektroszkópiás mérésekkel kimutatták, hogy a hetvenes évek után tavasszal az Antarktisz fölött egyre kevesebb az ózon. A nyolcvanas évek elejére a csökkenés elérte az ötven százalékot. A későbbi vizsgálatok azt is kimutatták, hogy különösen 20 km-es magasság körül jelentős a csökkenés, ahol megközelíti a kilencven százalékot. Az intenzív vizsgálatok (például Molina kísérletei) azt is kiderítették, hogy az ózonlyukat az Antarktisz feletti speciális meteorológiai és kémiai feltételek kölcsönhatása hozza létre (lásd Mészáros, 1997; Wameck, 1999; Jacobson, 2002), és hogy kiváltásában a freonok meghatározó szerepet játszanak. Nemzetközi egyezmények hatására ezért a freonok felhasználása az utóbbi években jelentősen mérséklődött.

A 20. század első felében úgy gondolták, hogy a talajközeli levegőben lévő ózon teljes egészében a sztratoszférából származik. A negyvenes évek kaliforniai légszennyeződési helyzetei alaposan rácafooltak erre a nézetre. Ebben az időszakban Kaliforniában, elsősorban Los Angelesben a nagy gépkocsiforgalom, az erős napütés és a csaknem mozdulatlan levegő komoly légszennyeződési problémákhoz vezettek. A levegő izgatja az emberek szemét és nyálkahártyáját, pusztult a növényzet. *Arie Haagen-Smit* (1900-1977), Kaliforniában élő holland biokémikus 1948-ban mutatta ki (Jacobson, 2002), hogy a laboratóriumban magas ózonkoncentrációnak kitett növények pontosan olyan károkat szenvednek, mint a kinti vegetáció magas légszennyeződés esetén. Azt is kimutatta, hogy a nagy ózonkoncentráció izgatja a szemet, roncsolja a különböző anyagokat (például gumicsöveket) és

légzési zavarokat okoz. Az ózon keletkezésének magyarázata céljából 1952-ben a következő kísérletet végezte el. Megfelelő kamrába nitrogén-dioxidot és reaktív szerves vegyületeket vezetett. Ha a kamrát napfényrel világította meg, akkor a kamrában ózon keletkezett. Ezek után feltételezte, hogy az atomos oxigén a nitrogén-dioxid fotokémiai bomlásakor keletkezik. A probléma már csak az volt, hogy a kipufogógázokban nem nitrogén-dioxid, hanem nitrogén-monoxid kerül a levegőbe. A további kutatások ezért a nitrogén-monoxid oxidációjának megmagyarázására irányultak (lásd Mészáros, 1997; Wameck, 1999; Jacobson, 2002).

Jóval később az addig végzett mérések adatait felhasználva, Crutzen (1974) modellszámításokkal igazolta, hogy ózon a troposzférában is állandóan keletkezik. Nem szennyezett területeken a szükséges elővegyületeket a bioszféra produkálja. Becslések szerint globális léptékben a keletkező troposzférikus ózon kétharmada helyben keletkezik, és nem a sztratoszférából származik. A troposzférikus ózon, elsősorban a belőle és vízgőzből keletkező szabad gyökök révén meghatározza a levegő oxidációs állapotát. Ezen keresztül szabályozza a metán és szén-monoxid, valamint számos egyéb nyomgáz (például kén-dioxid, különböző szerves gázok) légköri mennyiségét, végső soron a troposzféra kémiai folyamatait.

A légköri ózon kutatása a 20. században igen fontos eredményekhez vezetett. Ezek a kutatások elősegítették, hogy a levegő tulajdonságait sokkal mélyebben ismerjük meg. Ráadásul az ózon keletkezésének és bomlásának kérdése szorosan kapcsolódik az emberi tevékenység és a levegőkörnyezet kapcsolatának feltárásához. A kutatások jelentőségét a Svéd Tudományos Akadémia is felismerte. Az 1995-ös kémiai Nobel-díjat Paul Crutzen, Mario Molina és Sherry Rowland az ózonkutatásban elért eredményeikkel érdemelték ki.

A 20. század: aeroszol részecskék

A 20. századi kutatások nagy eredménye, hogy kiderítik, hogy a levegőben nemcsak „por” található, hanem a pomál jóval kisebb lebegő részecskék is, a levegő hatalmas aeroszolt alkot (Schmauss – Wigand, 1929). A pomál kisebb részecskéket először egyszerűen „füstnek” nevezik, és hosszú idő telik el, amíg kiderül, hogy a „füstrészecskéket” nemcsak égéstermék, hanem bármely kondenzációval keletkezett anyag felépítheti. A mai szóhasználat szerint az 1 mm átmérőnél kisebb részecskéket finom, a felszín aprózódásával létrejövő nagyobbakat durva részecskéknél nevezük.

Ezen a területen az első fontos felfedezést *Gustav Mie* (1868-1957) teszi (Mie, 1908). A német fizikus kimutatja, hogy abban az esetben, ha a szóró részecske átmérője összehasonlítható a napsugárzás hullámhosszával, akkor nem alkalmazható a Rayleigh-féle törvény (lásd fent): a fényszórás független a sugárzás hullámhosszától. Azért látjuk a felhőket és a párás levegőt fehérek. Másrészt a fényszórás a részecske keresztmetszetétől és anyagának törésmutatójától függ. A keresztmetszettől való függés az okozója annak a megfigyelt ténynek, hogy a látástávolság a levegő relatív nedvességének növekedésével csökken. A nedvszívó részecskék ugyanis a relatív nedvesség emelkedésekor egyre nagyobb átmérőjűek lesznek. A Mie-féle elmélet lehetővé teszi a látótávolság változásának helyes értelmezését: a látótávolságot a levegőben lévő aeroszol részecskék tulajdonságai szabályozzák. Ha a fényintenzitás gyengülésénél csak a levegőmolekulákat vesszük figyelembe (Rayleigh-féle szórás), akkor a látótávolság a levegőben mindig kb. 330 km lenne.

Az aeroszol részecskék nagysága széles határok között változik. A molekula-aggregátumok („nanorészecskék”) és a legnagyobb porrészecskék (10 mm) mérete

között mintegy négy nagyságrend a különbség. Ezért, a gázokkal szemben, ebben az esetben nemcsak a koncentrációt, hanem a *nagyság szerinti eloszlást* (a koncentráció gyakorisága a méret függvényében) is jellemeznünk kell. A német *Christian E. Junge* (1912–1996), a levegőkémia nagy úttörője, az első ilyen tárgyú kézikönyv szerzője (Junge, 1963) az ötvenes évek elején először mutatott rá, hogy a különböző nagyságú, különböző módszerekkel tanulmányozott részecskéknél folytonos a nagyság szerinti eloszlása. Húsz évvel később az amerikai *Kenneth Thomas Whitby* (1925–1983) ismerte fel, hogy a légköri aeroszol-részecskék nagyság szerinti eloszlása több eloszlásból tevődik össze, ami összefüggésbe hozható a részecskék keletkezésével és dinamikus folyamataival (például egyesüléssel, koagulációval). Ily módon vált lehetségessé a finom és durva aeroszol-részecskék kémiai különbségének értelmezése (Whitby, 1978).

Szintén Junge (1963) mutatta ki, hogy a troposzférában viszonylag egységes részecskepopuláció található, melyet háttéraeroszolnak nevezünk. Ő fedezte föl, hogy a sztratoszférában egy aeroszolóréteg helyezkedik el, amely összefüggésben van a vulkánkitörésekkel. Ezt a ma már Junge-rétegnek nevezett tartományt szulfátból álló részecskék töltik ki. Junge nevéhez fűződik annak igazolása is, hogy a finom részecskék tömegének jelentős része szárazföldi környezetben kénsavból, illetve *ammónium-szulfátból*, kisebb mértékben nitrátból épül fel. A részecskék a kén-dioxidból keletkező kénsav, a nitrogén-dioxidból származó salétromsav, illetve ammóniagáz kondenzációja útján keletkeznek. Ezek a kutatások, a csapadékvíz kémiai összetételének vizsgálatával együtt felhívták a figyelmet a kén- és nitrogénvegyületek légköri körforgalmának tanulmányozására, és lehetővé tették az ökoszisztémáknak nagy kárt okozó *savas*

esőokossági értelmezését. Végül a hetvenes évek elején magyar kutatók bizonyították be, hogy a finom részecskék az óceánok fölötti levegőben is szulfátból állnak (Mészáros – Vissy, 1974). Mivel ezek a kis részecskék, a durva részecskéktől eltérően, nem tengeri sóból származnak, ez az eredmény fölvetette az óceáni eredetű kén-gázok tanulmányozásának fontosságát és elvezetett a légköri dimetil-szulfid (DMS) felfedezéséig (lásd Wameck, 1999). A DMS felfedezése egyúttal a légköri kénkörnyezet helyes megalkotását is lehetővé tette.

A fűtésből származó füst és korom légköri jelenléte, illetve káros hatása már rég közismert (Brimblecombe, 1999). Különösen Nagy-Britanniában okozott ez a szennyeződési forma súlyos egészségi problémákat. *Harold Antoine Des Voeux*, az 1909-es skóciai katasztrófa után, 1911-ben javasolta az ilyen helyzetek megnevezésére a „szmog” kifejezést, amelyet az angol füst („smoke”) és köd („fog”) szavak egyesítésével képzett. Azóta is az ilyen jellegű légszennyeződést „londoni szmognak” nevezzük. Ennek mintájára keletkezett Kaliforniában a fotokémiai szmog („Los Angeles-i szmog”) kifejezés, amely a közlekedési kibocsátásokból a nap-sugárzás hatására létrejövő szennyeződést jelöli.

Ma már tudjuk, hogy a finom részecskék elsősorban szulfátból és szerves anyagokból állnak. A durva részecskék az óceánok feletti levegőben tengeri sóból (elsősorban nátrium-kloridból), szárazföldi környezetben talajeredetű elemekből (alumínium, szilícium, vas, kalcium stb.) tevődnek össze. Ez utóbbiak, valamint az emberi tevékenységből származó egyéb fémek (például ólom, kadmium) kimutatásában fontos szerepet játszottak azok a nukleáris módszerek, amelyek roncsolásmentes analízist tesznek lehetővé (lásd Mészáros, 1999). Jelenleg a részecskék kémiai kutatása elsősorban a széntartalmú részecskék természetének

megállapítására irányul. Ezek a részecskék részben elemi szénből, részben számos szerves vegyületből épülnek föl, amelyek részletes vizsgálatára, módszertani okokból, csak a legutóbbi években kerülhetett sor (lásd Gelencsér, 2004).

A légköri aeroszol kutatásának fontos részét képezik azok a vizsgálatok, amelyek célja a köd- és felhőképződésben szerepet játszó *kondenzációs magvak* természetének tisztázása. A problémát az okozza, hogy a felhőkben a vízre vonatkoztatott túltelítettség nagyon alacsony, kevesebb, mint 1%, szemben az Aitken által alkalmazott tágitási kamrák háromszoros túltelítettségével. Más szavakkal az aeroszol részecskéknél csupán egy kis hányada szolgáltat kondenzációs magvakat. Ilyen kis túltelítettségek ún. diffúziós kamrákban állíthatók elő, amelyeket az ötvenes évek közepétől kezdtek légköri megfigyelésekre alkalmazni. Különböző fizikai és kémiai módszereket diffúziókamrás mérésekkel kombinálva az ausztrál *Sean Twomey* mutatta ki, hogy a felhőképződésben aktív magvakat („felhőkondenzációs magvak”) a 0,1 mm-nél kisebb ammónium-szulfát részecskék szolgáltatják (Twomey, 1972). Jelenlegi ismereteink szerint ez a megállapítás annyiban módosul, hogy a vízben oldódó szerves részecskék szintén részt vesznek a vízgőz kondenzációjában. Az aeroszol szerves hányadának jelentős része ugyanis vízben oldódik, és hasonlóképpen viselkedik, mint a humin anyagok közül a fulvosavak (Gelencsér, 2004).

Az utóbbi tíz-tizenöt évben az aeroszol részecskék kutatása új lendületet vett. Egyre bizonyosabbá vált, hogy az aeroszol részecskék az *éghajlat szabályozásában* nem elhanyagolható szerepet játszanak, és ellentétes hatást váltanak ki, mint az üvegházhatású gázok. Modellszámításaik alapján elsőknek az amerikai *Robert J. Charlson* és munkatársai javasolták, hogy a jelentősen szennyezett

területek fölött a szulfátrészecskék hűtő hatása kiegyensúlyozhatja az üvegházhatású gázokét (Charlson et al., 1991). Ez a hatás a részecskék sugárzást szóró tulajdonsága miatt lép fel. Az is kiderült, hogy a részecskék nemcsak közvetlenül csökkentik a felszínre jutó napenergia mennyiségét, hanem közvetett módon is. A kondenzációs magvak száma ugyanis meghatározza, hogy adott túltelítettségen hány darab és mekkora felhőcsepp jön létre. Minél nagyobb az aeroszol részecskék száma (például emberi hatások miatt), annál nagyobb koncentrációjú, de kisebb felhőcsepp keletkezik, mivel a kondenzálható vízgőz többfelé oszlik el. Az ilyen felhők nemcsak nehezebben adnak csapadékot, hanem jobban szórják a napsugarakat, mint a kevés nagyobb cseppekből álló felhők. Ily módon hűtik az alattuk lévő légrétegeket (Twomey, 1991). A kutatások ezen a területen egyre intenzívebben folynak. Két alapvető probléma van. Egyrészt az aeroszol részecskék tartózkodási ideje jóval rövidebb (mintegy tíz nap), mint az üvegházhatású gázoké. Hatásuk ezért a források környékére korlátozódik, míg az üvegházhatású gázok globális felmelegedést okoznak. Másrészt az aeroszol részecskék nagysága, formája és kémiai összetétele igen változékony, szemben az egymással teljesen azonos gázmolekulákkal. Éghajlati hatásuk modellezése ezért sokkal nehezebb, mint az üvegházhatású gázoké (ahol azért szintén vannak még problémák). További kutatásokra van ezért szükség, hogy megbízható módon feltárhassuk a levegő és az emberi tevékenység kapcsolatát.

Záró gondolatok

A levegő kémiai összetételét a 20. században elég nagy pontossággal ismertük meg. Ez az összetétel azonban meglehetősen furcsa. A levegőt alkotó gázkeverék eltér a fizikai-kémiai egyensúlyi feltételektől. A nitrogénnek lassan oxidálódnia kellene, és egyensúlyi for-

mája az óceánvízben oldott nitrát lenne. Nem is beszélve arról, hogy az oxidatív levegőben redukált vegyületek is (például metán, ammónia) viszonylag jelentős koncentrációban fordulnak elő. Bizonyos előzmények után erre Lovelock (1979) mutatott rá, aki kimondta, hogy a levegő entrópiája messze van a maximális értéktől, hasonlóan mint a biológiai rendszerek esetén. Posztulálta, hogy a levegő része a bioszférának, és minden összetevője meghatározott „feladatot” lát el. A referenciagáz az oxigén, amely oxidációval az energiát szolgáltatja. Ugyanakkor a szomszédos, élet nélküli bolygók légkörében nincs oxigén, a gázburkot szén-dioxid alkotja, kémiai folyamatok nem mennek végbe, következésképpen ezek a légkörök egyensúlyban vannak. Ezen a meglátáson alapul a *Gaia hipotézis*, amely szerint az élőlények nemcsak elszennvedik, hanem „saját érdekükben” irányítják a környezeti feltételeket.

A 20. századi kutatások arra is rámutattak, hogy a Föld egyes tartományai (bioszféra, hidroszféra, pedoszféra, légkör) egymással állandó kölcsönhatásban vannak (magyarul lásd Papp, 2002). A különböző elemek (vegyületek) folyamatosan áramlanak egyik tartományból a másikba, részei egy hatalmas anyagciklusnak, a *biogeokémiai körforgalomnak* (ennek az elképzelésnek Magyarországon *Szádeczky-Kardoss Elemér*, neves geokémikus volt az úttörője). Adott szférában a kémiai összetétel akkor változatlan, ha az időegység alatt beáramló és a kiáramló anyagok tömege egymással egyenlő. Így a levegőbe a gázok általában a bioszférából kerülnek: az oxigén például a növények és egyes baktériumok fotoszintézisével, a szén-dioxid a légzéssel és a szerves anyagok bomlásával. Ezt az évmilliók során kialakult állapotot zavarja meg az emberi tevékenység, amely anyagokat mozgat meg, felhasznál, és a nemkívánatos anyagokat a környezetbe bocsátja. Ebből következik, hogy a levegő összetételének tanulmá-

nyozása, az ember és a levegőkörnyezet kapcsolatának feltárása elképzelhetetlen a Föld többi tartományának vizsgálata nélkül: bolygónk egységes egészet alakot. A levegő tanulmányozásának története tehát nemcsak a tudománytörténet egyik érdekes fejezete, hanem rádöbrentett bennünket

arra, hogy a légkör, ezen keresztül életünk megértéséhez a Föld bolygó egészének működését kell megértenünk.

Kulcsszavak: *levegő, légkör, összetétel, nyomgázok, üvegházhatású gázok, ózon, aeroszol részecskék, tudománytörténet*

IRODALOM

- Aitken, John (1880): On Dust, Fogs And Clouds. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*. **30**, 337–368.
- Brimblecombe, Peter (1999): History Of Urban Pollution. In: Fenger, Jes – Hertel, O. – Palmgren, F. (eds.) *Urban Air Pollution – European Aspects*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 7–20.
- Chapman, Sydney (1930): On Ozone and Atomic Oxygen in the Upper Atmosphere. *Philosoph Magazine*. **10**, 369–383.
- Charlson, Robert J. – Langner, J. – Rodhe, H. – Leovy, C. B. – Warren, S. G. (1991): Perturbation of the Northern Hemisphere Radiative Balance by Backscattering from Anthropogenic Aerosols. *Tellus*. **43A-B**, 152–163.
- Crutzen, Paul J. (1970): Ozone Production Rates in an Oxygen-Hydrogen-Nitrogen Oxide Atmosphere. *Journal of Geophysical Research*. **76**, 7311–7327.
- Crutzen, Paul J. (1974): Photochemical Reactions by and Influencing Ozone in the Troposphere. *Tellus*. **26**, 47–57.
- Faman, Joseph C. – Gardiner, B. G. – Shanklin, J.D. (1985): Large Losses in Total Ozone in Antarctica Reveal ClO_x/NO_x Interaction. *Nature*. **315**, 207–210.
- Gelencsér András (2004): *Carbonaceous Aerosol*. Springer, Dordrecht
- Jacobson, Mark Z. (2002): *Atmospheric Pollution: History, Science, and Regulation*. Cambridge University Press, Cambridge
- Junge, Christian E. (1963): *Air Chemistry and Radioactivity*. Academic Press, New York–London
- Keeling, Charles D. (1960): The Concentration and Isotopic Abundance of Carbon Dioxide in the Atmosphere. *Tellus*. **12**, 200–203.
- La Cotardière, Philippe de (2004) (ed): *Histoire des sciences: de la préhistoire à nos jours*. Tallandier, Paris
- Lovelock, James E. (1979): *Gaia. A New Look at Life on Earth*. Oxford University Press, Oxford
- Mészáros Ágnes – Vissy Károly (1974): Concentration, Size Distribution and Chemical Nature of Atmospheric Aerosol Particles in Remote Oceanic Areas. *Journal of Aerosol Science*. **5**, 101–110.
- Mészáros Ernő (1997): *Levegőkémia*. Veszprémi Egyetemi, Veszprém
- Mészáros Ernő (1999): *Fundamentals of Atmospheric Aerosol Chemistry*. Akadémiai, Budapest
- Mie, Gustav (1908): Reports on the Turbid Media, Especially Metallic Colloidal Suspensions (in German): *Annalen der Physik*. **25**, 377–445.
- Molina, Mario – Rowland, F. Sherwood (1974): Stratospheric Sink for Chlorofluoromethane-Chlorine Atom Catalysed Destruction of Ozone. *Nature*. **249**, 810–812.
- Papp Sándor (2002): *Biogeokémia. Körfolyamatok a természetben*. Veszprémi Egyetemi, Veszprém
- Sagan, Carl (1980): *Cosmos* Random House, New York
- Saggs, Henry W. F. (1999): *The Babylonians*. The Folio Society, London
- Simonyi Károly (1981): *A fizika kultúrtörténete*. Gondolat, Budapest
- Schmauss, August–Wigand, Albert (1929): *Die Atmosphäre als Kolloid*. Vieweg und Sohn, Braunschweig
- Twomey, Sean (1972): Measurement of the Size of Natural Cloud Nuclei by Means of Nuclepore Filters. *Journal of the Atmospheric Sciences*. **29**, 318–321.
- Twomey, Sean (1991): Aerosols, Clouds And Radiation. *Atmospheric Environment*. **25A**, 2435–2442.
- Wameck, Peter (1999): *Chemistry of the Natural Atmosphere*. Academic Press, San Diego
- Whitby, Kenneth T. (1978): The Physical Characteristics of Sulfate Aerosols. *Atmospheric Environment*. **12**, 135–159.