

Izsák Lajos – Kun Miklós (szerk.): *Moszkvának jelentjük... Titkos dokumentumok 1944–1948*. Budapest: Századvég Kiadó, 1994

Juhász Gyula (összeáll.) (1978): *Magyar–brit titkos tárgyalások 1943-ban*. Budapest: Kossuth Kiadó

Krebs Hans (1983): Hibák, téves kiindulási pontok és kudarcok a kutatásban. In: Szent-Györgyi Albert: *Válogatott tanulmányok*. Budapest: Gondolat, 305–307.

Laki Kálmán (1983): Visszaemlékezés a Szent-Györgyi Alberttel töltött évekre. In: Szent-Györgyi Albert: *Válogatott tanulmányok*. Budapest: Gondolat, 289–301.

Magyar Nemzeti Levéltár Országos Levéltára: MNL. OL. P. 2148 1945–54. 16. tétel. Az MSZMT tevékenységével kapcsolatos pénzügyi, gazdasági stb. ügyek [34/2. sz.] 30. d

Magyar Nemzeti Levéltár Országos Levéltára: MNL. OL. XIX-B-1-h Belügyminisztérium Egyesületi Főosztály sz. n. 83. d. Jegyzőkönyv felvétel Budapest 1945. június 9-én a Magyar-Szovjet Művelődési Társaság alakuló közgyűléséről.

Moss, Ralph W. (2003): *Szent-Györgyi Albert*. (ford. Bakács Tibor) Budapest: Typotex Kiadó

Nagy Ferenc (1989): A harcos humanista. In: Nagy Ferenc – Bay Zoltán – Dénes Gábor – Wisinger István: *Szent-Györgyi Albert-dokumentumok, riportok*. Budapest: Akadémiai Kiadó, 38–208.

Pázmány Péter Tudományegyetem Orvostudományi Kar - tanártestületi ülések, 1945-1946/11945. november 20., VII. rendkívüli ülés 1081/1945-46. sz. bejegyzés. • <http://tinyurl.com/jawlk9w>

Ránki György (szerk.) (1983): Hitler hatvannyolc tárgyalása 1939–1944. Hitler Adolf tárgyalásai kelet-európai államférfiakkal. 2. kötet. (*Tények és tanúk*) Budapest: Magvető Kiadó

Révai József (1951): *A szocializmus építésének útján. A Magyar Dolgozók Pártja II. kongresszusának anyagából*. Budapest, Szikra Kiadó

Szabó Tibor – Zallár Andor (1989): *Szent-Györgyi Albert Szegeden és a Szent-Györgyi Gyűjtemény*. (Tanulmányok Csongrád megye történetéből XV.) Szeged: Csongrád Megyei Levéltár • <http://tinyurl.com/gnulaml>

Szent-Györgyi Albert (1946a): Magyarország jövője a kultúrával áll vagy bukik. Szent-Györgyi Albert nyílt levele a Magyar Nemzetgyűléshez. *Új Magyarország*, augusztus 20. 8.

Szent-Györgyi Albert (1946b): Szent-Györgyi Albert levele Bán Antal iparügyi miniszterhez. 1946. november 3. MNL. OL. XIX-F-kk—4. doboz • <http://tinyurl.com/z6pvnrd>

Szent-Györgyi Albert (1963): Lost in the Twentieth Century. *Annual Review of Biochemistry*. 32, 1–15. • <http://tinyurl.com/zm2rf4n>

Szent-Györgyi Albert (1976): Some Reminiscences of my Life as a Scientist. *International Journal of Quantum Chemistry*. 10, S3, 7–12. DOI: 10.1002/qua.560100704

Tasiné Csúcs Ildikó – Tasi Domonkos Attila (2016): Egy tragikus tévedés és következményei. A szocialista cenzúra kihívásai Szent-Györgyi Albert önéletrajzi írásából. *Szeged: a vírus folyóirata* 28, 1, 42–48. • <http://tinyurl.com/jf2g9fj>

Tilkovszky Lóránt (1975): A Magyar Tudományos Akadémia a felszabadulás után 1945–1948. In: Vörös Antal (szerk.): *A Magyar Tudományos Akadémia másfél évszázada, 1825–1975*. Budapest: Akadémiai Kiadó, 347–361.

Ungváry Krisztián (2016): Távoli hazafi. *Magyar Nemzet*. 2016. június 25–26. hétfője. 79, 148, 26–27.

Varga László (2008): Kiválóság és jellem: Szent-Györgyi Albert, az ember. *Magyar Tudomány*. 169, 7, 849–854. • <http://www.matud.iif.hu/08jul/07.html>

URL: <http://tinyurl.com/z6pvnrd>

A FÖLD KÜLÖNLEGES LÉGKÖRÉNEK KIALAKULÁSA ÉS FEJLŐDÉSE

Mészáros Ernő

az MTA rendes tagja, professor emeritus
Veszprémi Akadémiai Bizottság
meszaroserno@invitel.hu

A légkör a bolygó arca.
(James Lovelock)

A levegő számunkra a legfontosabb környezeti anyag. Nélküle csak néhány percet élhetnénk. Ennek ellenére, talán azért, mert bőségesen rendelkezésünkre áll, nem nagyon vesszük róla tudomást. Sőt a köznyelv időnként a semmivel azonosítja, a semmi szót a levegővel helyettesíti. Pedig már a régi görögök is tudták, hogy a levegő anyag, mint ezt Empedoklész az i. e. V. században bizonyította. Szintén ő volt az a gondolkodó, aki javasolta, hogy a bennünket körülvevő világ négy alapelemből, levegőből, vízből, tűzből és földből áll. Véleményét Arisztotelész is elfogadta, aki nek a tanait a keresztény világ évszázadokon át követte. Csak a felvilágosodás idején, Joseph Priestley és Carl Wilhelm Scheele kísérletei után derült ki (Mészáros, 2008), hogy a levegő nem elem, hanem különböző gázok elegye, és jelentős mértékben egy égést tápláló anyagból, oxigénből áll.

A levegő különleges gázkeverék. Összetétele alapvetően eltér a szomszéd bolygók légkörének összetételétől: a Vénuszt nagynyomású, a Marsot kisnyomású szén-dioxidból álló gázburkok övezi. Légkörünk, a levegő önmagában is különleges: fizikai-kémiai

szempontból nincs egyensúlyban, entrópiája nem maximális. Az oxigénnek a nitrogén lassan oxidálnia kellene: egyensúlyban a nitrogén az óceánvízben nitrát formában fordulna elő (Lovelock, 1979).¹

Végül: légkörünk nem mindig volt olyan, mint a jelenlegi levegő. Nemcsak az összetétele különleges, hanem a története is, mely összefügg az élet keletkezésével és fejlődésével. A Föld története során a bioszféra határozta meg a légkör jellegét, ugyanakkor a légkör tette lehetővé az élőlények létrejöttét és evolúcióját. Jelen tanulmánynak az a célja, hogy légkörünk keletkezését és fejlődését az 1%-nál nagyobb részarányban előforduló fő összetevők (oxigén, nitrogén, argon) történetén keresztül felvázolja. Ezen belül különös figyelmet szentelünk a bolygó arculatát meghatározó oxigénnek: a Föld légkörének fejlődése lényegében az oxigén feldúsulásának története. Ugyanakkor foglalkozni fogunk az éghajlat alakítása szempontjából oly fontos szén-dioxiddal is, amely ma már nyomanyagnak számít, de a Föld keletkezése után légkörünk egyik legfontosabb összetevője volt.

¹ Lovelock ezért úgy gondolja, egy adott bolygó légkörének összetétele elárulja, hogy van-e rajta élet. Az egyensúly hiánya az élet jelenlétére utal.

Őslégkör: oxigén nélkül

A Föld kb. 4,5 milliárd évvel ezelőtt egymással ütköző kisebb-nagyobb szilárd darabokból, részecskékből tevődött össze. A szilárd részecskék magja feltehetően szilíciumból, elemi vasból és szénből állt, amelyet hidrogén, szén, nitrogén és oxigén elemekből álló burok vett körül. A burokban az elemek fagyott vizet, hidratált ammóniát, metánt és más szerves szénvegyületeket alkottak. A keletkező bolygót a könnyű gázok, így a hidrogén és hélium hamar elhagyták. A szilíciumra vonatkozó arányukból következik, hogy elszökött a nemesgázok nagy többsége is, valószínűleg még a jelenlegi bolygó méret (gravitáció) elérése előtt. A kozmoszból érkező részecskék minden bizonnyal alacsony hőmérsékletűek voltak. Az ütközések miatt keletkező hő azonban felmelegítette az előbolygót, amit az intenzív radioaktív bomlás is fokozott. A magas hőmérséklet következtében az elemek molekulatömegük szerint elkülönültek, így a vas (és a nikkel) lesüllyedt, és létrehozta a bolygó magját. Ez a forró, növekedési (akkréciós) időszak kb. 10–100 millió évig tartott. Rövidebb ideig, mint azt régebben gondolták.

A kezdeti légkör azokból az illékony anyagokból állt, amelyek az ütközésekkor a gázburokba kerültek. Így vízből, ammóniából és metánból, valamint hidrogénből, amely a becsapódó elemi (nullaoxidációs szintű) vas és a vízgőz kölcsönhatásával keletkezett. Ez az átmeneti, ún. „gőzlégkör” a bolygó korához képest nagyon rövid ideig létezett. Az elemi vas lesüllyedése után ugyanis (Holland, 1984) a víz az elemi szénnel kölcsönhatásba lépett, és szén-monoxid, illetve szén-dioxid képződött. Ebben a forró környezetben továbbá az ammónia elbomlott, a metán szén-dioxiddá alakult. Az ammónia bomlása

molekuláris nitrogént hozott létre. Így a fel szabaduló gázok összetétele jelentősen megváltozott: a szén-dioxid és a nitrogén vált uralkodóvá. Ennek megfelelően négy milliárd évvel ezelőtt az őslégkör elsősorban nitrogénből és szén-dioxidból állt, és a nitrogén nyomása közelítette a mai értéket. Kisebb részarányban a gázburok szén-monoxidot, hidrogént és vizet, nyomokban metánt tartalmazott (Kasting, 1993).

Az ütközések számának csökkenése miatt a hőmérséklet mérséklődött, így a vízgőz nem maradt a légkörben, hanem kondenzálódott, létrehozva az óceánokat. Másrészt a hidrogén jelentős része elszökött a bolygóközi térbe. A légnyomás növekedésével azonban a szökés lelassult, mivel a többi molekula akadályozta a hidrogén függőleges diffúzióját. Megjegyezzük, hogy nagyon kis mennyiségben szabad oxigén az őslégkörben is keletkezett a víz, illetve szén-dioxid fotokémiai bomlása útján. Az akkori viszonyokat figyelembe vevő modelszámítások szerint azonban mennyisége elhanyagolható volt, a mai érték billiomod része (Kasting, 1993; Warneck, 1999).

A Föld nem volt egyensúlyban. A földképenyben intenzív fel- és leáramlások mozgatták az anyagot. A feláramló magma időnként a felszínre tört, és a vízben kis megszilárdult egységeket, *kratonokat* hozott létre, amelyek a szárazföldek embrionális ősei voltak. Geológiai leletek szerint a nyugat-ausztráliai kraton 4,4 milliárd éves. Valószínű, hogy a szárazföldek kialakulása már valamikor több mint 4 milliárd évvel ezelőtt megkezdődött, és az élet keletkezése idején, mintegy 3,8 milliárd évvel ezelőtt, vastag szárazföldi tömbök léteztek.

Az élet keletkezésének megmagyarázására több elképzelés látott napvilágot. Az egyik, talán legelfogadhatóbb nézet szerint az első élőlények a sekélyebb tengeröblökben jöttek

létre. Elképzelhető, hogy először saját magukat reprodukáló RNS-molekulák, majd egyszerű sejtek formájában. A sejtek a testüket a sekély vízben feldúsult szerves anyagokból építették föl a napenergia segítségével. A részletek természetesen nem ismertek.² Mindenesetre az amerikai Stanley L. Millernek laboratóriumában sikerült aminosavakat létrehozni redukált gázok, víz és elektromos kisülések segítségével (Miller, 1953). Később azonban nyilvánvalóvá vált, hogy az őslégkör kevésbé volt redukív, mint az ő kísérleteiben: a szén elsősorban szén-dioxid és nem metán, a nitrogén molekulárisan és nem ammónia formájában volt jelen. Ezért a kísérleteket megisméltették ilyen gázelegyekkel. Aminosavak ugyan nem keletkeztek, de számos komplex szerves molekula, így az aminosavak felépítéséhez szükséges hidrogén-cianid jött létre, mutatva, hogy az egyszerűbb szerves molekulákból ilyen körülmények között bonyolultabb vegyületek állnak össze (Holland, 1984).

Az aminosavaktól a baktériumokig vezető, nem túl jól ismert utat³ átugorva induljunk ki a mintegy 3,8 milliárd évvel ezelőtti időszakból, amikor a tengerekben már léteztek egysejtű, sejtmag nélküli baktériumok, prokarióták. Az anyagcseréjükhez szénre, oxigénre és hidrogénre volt szükségük. A szén és oxigén szén-dioxid formában az őslégkörben adva volt. Valószínű, hogy az akkori légkörben fotokémiai úton keletkeztek a cukrok szintéziséhez szükséges formaldehid

molekulák, amelyeket a csapadékvíz az óceánokba juttatott. Meghatározó jelentőségű, hogy a fotoszintetizáló egysejtűek honnan vették a szénhidrátok felépítéséhez szükséges hidrogént. Hidrogénforrásként kézenfekvő lehetőség volt maga a hidrogén és a kénhidrogén. A forradalmi lépés akkor következett be, amikor egyes egysejtűek (cianobaktériumok: kékeszöld algák) hidrogendonorként elkezdték a vizet használni: kialakult a fotoszintézis mai formája. Ehhez több energiára volt szükség, de az energiát a Nap szolgáltatta. Ennek a bolygó további sorsa szempontjából forradalmi jelentősége volt: a végtermékek között megjelent a szabad oxigén. Az ilyen típusú fotoszintézis minden bizonnyal már 3,5 milliárd évvel ezelőtt megkezdődött, hiszen találtak ilyen korú egyedi képződményeket, ún. sztramatolitokat, amelyeket az elhalt cianobaktériumok mészkővel alkottak.

Ha az élet a sekély tengervízben keletkezett, akkor a Föld hőmérséklete nem különbözhetett alapvetően a jelenlegi értékektől (Möller, 2014). A víz szélső esetben nem forrhatott, és nem fagyhatott meg. A problémát az jelenti, hogy a Nap teljes energiája (az erős UV sugárzás ellenére) ebben az időszakban mintegy 25%-kal kisebb lehetett, mint a jelenlegi érték. Ezt a csillagászok a jelenleg születő, Naphoz hasonló csillagok fényessége alapján állapították meg. Ez az ún. *hideg Nap paradoxon* csak úgy oldható fel, ha a fentiek alapján elfogadjuk, hogy közel négy milliárd évvel ezelőtt az őslégkör jóval több üvegházhatású gázt, elsősorban szén-dioxidot tartalmazott, mint napjainkban.⁴ Számítások szerint az élet

² 3,8–4,5 milliárd évvel ezelőtt, a növekedési időszak után is kisebb-nagyobb szilárd égitestek bombázták a földet (így született a Hold is). Egy 100 km nagyságú test becsapódása az összes cseppfolyós vizet elpárologtathatta (Kasting, 1993). Lehet, hogy élet többször is keletkezett?

³ Mindenesetre aminosavakból már sikerült polipeptideket és egyszerű fehérjéket előállítani.

⁴ Üvegházhatású gázok: a legalább két különböző atomot tartalmazó molekulák a Nap rövidhullámú (max. 500 nm) sugárzását átengedik, ám a Föld hosszuhullámú (jelenleg 10 000 nm) sugárzását elnyelik.

keletkezésének idején a szén-dioxid parciális nyomása mintegy hatszázszor nagyobb lehetett, mint manapság, míg a felszíni hőmérséklet 85 °C körül mozoghatott (Kasting, 1993). Minden jel arra mutat, hogy a Föld története során a hőmérséklet sohasem volt olyan szélsőséges, hogy veszélyeztette volna az életet. Ebből következik, hogy a szén-dioxid pont olyan ütemben került a karbonátos kőzetekbe, hogy az üvegházhatás csökkenése kiegyenlítette a napsugárzás energiájának növekedését. A légköri szén-dioxid és a szilikátos kőzetek reakciója következtében a szén-dioxid a légkörünkben lassan nyomanyaggá vált, így kb. 600 millió éve mennyisége már közel lehetett a jelenlegi értékhez. Ez a folyamat a szomszédos Vénusz bolygón a kisebb naptávolság miatti magas (300 °C fölötti) hőmérsékleten nem következett be.

Az oxigénszint emelkedése

Az oxigén kezdetben a gyengén redukív környezetben élő egysejtűek számára nyilvánvalóan mérgező volt: környezeti katasztrófát okozott. Aztán egyes egysejtűek „rájöttek” arra, hogy az oxigén felhasználása, a légzés nagyszerű energiaforrás, sokkal hatékonyabb, mint a fotoszintézis. Az első lélegző szervezetek feltehetően prokarióták voltak, amelyek később beépültek a megjelenő, sejttaggal rendelkező eukariótákba, azokkal szimbiózisban éltek (Margulis, 2000).

Az oxigén felhalmozódása a környezetben azonban hosszú ideig nem kezdődött meg. Az oxigén a redukált anyagok oxidációjára használódott el. Különösen jelentős volt egyes kőzetek, illetve a bennük lévő redukált állapotban lévő vegyületek, így a vas(II)-oxid oxidációja. Ez a helyzet kb. kétmilliárd évvel ezelőtt változott meg. Becslések szerint a 2,0–2,5 milliárd évnél régebbi időszakban a fotoszin-

tézis tizedannyi oxigént produkált, mint napjainkban. Ám a termelt oxigénnek csak 10%-a került a bioszférába (Lovelock, 1979). Mintegy kétmilliárd éve az oxigéntermelés hirtelen megugrott: már a jelenlegi harmada volt, s ezt már csaknem eljes egészében a légzés használta el. Az óceánvizek oxigéntartalmának növekedése kiváltotta a többsejtűek megjelenését, majd azt a forradalmi változást, amely 600 millió évvel ezelőtt végbement, amikor már szilárdvázus élőlények uralták a tengereket, mint ezt a Burgess-palában talált fossziliák bizonyítják (magyarul lásd Géczy, 1984). Ekkor a légkörben az oxigénkoncentráció már elhagyta a jelenlegi érték 1%-át. A tengereket rövidesen a halak uralták, amelyek mintegy 500–400 millió éve jelentek meg.

Említettük, hogy éghajlati szélsőségek sohasem veszélyeztették a bioszféra egészét. A kérdés a prekambriumi időszak (a kambrium 600 millió évvel ezelőtt kezdődött) tárgyalásakor azért aktuális, mert sok kutató véleménye szerint olyan hideg éghajlat uralkodott, amikor csaknem az egész Földet jégtakaró borította („hóglyó Föld”). Ez azonban az akkori óceáni bioszférát nem veszélyeztette: a földi életet megvédte bölcsője, a víz. A hóglyó Föld kialakulását az élet támogatói a szárazföldek elhelyezkedésével, és a légköri szén-dioxid-szint változásaival hozzák összefüggésbe. A hóglyó Föld léte nem általánosan elfogadott. Az viszont igen, hogy 600 millió évvel ezelőtt egyetlen hatalmas kontinens létezett (Pangea I). A lemeztektonikai mozgások ugyanis hol egyesítik, hol széttagolják a szárazföldeket, ami az éghajlatot is befolyásolja. Ha a szárazföldek egyesülnek, akkor hűvösebb az éghajlat, mivel kevésbé érvényesül az óceánok mérséklő hatása.

A légkör alapvetően 500 millió évvel ezelőtt változott meg, amikor az oxigén relatív

mennyisége elhagyta a 10%-ot. Ez azért volt lényeges, mert az oxigénből keletkezett ozonréteg megemelkedett, és megvédte a felszínt a halálos UV sugárzástól (Gradel – Crutzen, 1993). A háromatomos oxigénmolekula, az ózon (O₃) képződését a kétatomos (O₂) és az atomos (O) oxigén egyesülése váltja ki. Az atomos oxigén a napsugarakat a 180–210 nm-es hullámhosszában elnyelő kétatomos oxigén fotokémiai bomlása útján jön létre. Az ózon a 280 nm alatt teljesen, a 280–320 nm-es sávban részben elnyeli az UV sugárzást. Az ózon mennyisége és keletkezési magassága a felszín fölött egyenesen arányos az oxigén koncentrációjával. Az elnyelés következtében a bonyolultabb szerves molekulákat szétromboló nagyenergiájú fotonok nem érik el a felszínt. Az oxigén feldúsulásának köszönhetően a szárazföldek készen álltak az élet befojgadására. Ehhez persze olyan élőlények kellettek, amelyek erre képesek voltak.

A szárazföldre először a növények, pontosabban különböző mohák települtek. Ezt a korabeli kőzetekben található megkövesedett spórák, illetve magvak tanúsítják. A vizsgálatok szerint a legrégebbi talált szárazföldi spórákövület 450 millió éves. A növényeket rövidesen az állatok követték, nevezetesen a bojtosúszójú halak, amelyek mellső uszonyaikkal képesek voltak a tengerfenéken mozogni, mintegy lépkedni. Ezek az állatok hagyták el először a vizet, nyilvánvalóan valamilyen mocsaras területen. Tőlük származnak a kétlábúak, majd más szárazföldi állatok. Közben a növények a szárazföldeket gyorsan meghódították, ami elősegítette az oxigén feldúsulását. Kialakultak a termékeny talajok, a folyókba, tavakba nagymennyiségű tápanyag jutott.

Az oxigén jelenlegi térfogati aránya (kezeben 21%) mintegy 300 millió évvel ezelőtt alakult ki. Ez az az időpont, amióta légkörünk

összetétele, legalábbis ami a fő összetevőket (nitrogén, oxigén, argon) illeti, állandó. Más szavakkal ez az időpont, amikor az oxigén forrásai és nyelői a jelenlegi egyensúlyba kerültek. Érdekes kérdés, hogy vajon miért pont 21%-os értéken állt be az egyensúly. Nem a véletlen műve. Alacsonyabb értéken nem lenne a légzés számára elegendő oxigén. Magasabb értéken viszont elpusztulnának a fotoszintetizáló szervezetek. Arról nem is beszélve, hogy a tűzveszély sokkal nagyobb lenne (Lovelock, 1979).

Láttuk, hogy a légkör a bioszférával szoros összefüggésben fejlődött. 300 millió év óta azonban sem az oxigén mennyisége, sem a fő összetevők aránya nem változott: a fejlődés befejeződött. Hiba jelentek meg a zárwatermő növények, hiába haltak ki a dinoszauruszok, hiába alakultak ki az emlősök, a levegő alapvető összetétele ugyanaz maradt (ez természetesen nem vonatkozik az 1%-nál jóval kisebb részarányú nyomanyagokra). Nem változott a levegő tömege, így a nyomása sem.

Az oxigén teljes mérlege

A bioszféra a Föld története során hatalmas mennyiségű oxigént termelt. Kézenfekvő annak felvetése, hogy vajon hová lett ez a hatalmas tömeg, és hányad része tárolódik a jelenlegi légkörben. Induljunk ki abból, hogy a fotoszintézis az élet megjelenése óta 10²¹ mol szerves szenet hozott létre. Ez az érték geokémiai mérések alapján becsülhető meg. A fotoszintézis során 1 mol szerves szén keletkezésakor 1 mol oxigén szabadul fel. Így a teljes oxigénprodukciónak szintén 10²¹ mol, ami 32×10¹⁸ kg oxigénnek felel meg. Ha a teljesség kedvéért ehhez hozzávesszük a víz fotokémiai bomlásával (és a hidrogén elszökésével) keletkezett kis mennyiségű oxigént, akkor 33,9×10¹⁸ kg-ot kapunk eredményül.

A termelt oxigén oxidálta a redukált állapotban lévő anyagokat, így a gáznemű hidrogént, szén-monoxidot és kénhidrogént. Miután az oxigén feldúsulása a légkörben megkezdődött (kb. kétmilliárd évvel ezelőtt) molekulái kivonták a légkörből a Föld belsejéből felszabaduló hidrogénmolekulákat. A jelenlegi hidrogénkibocsátást, illetve magaslégtéri hidrogénszökést feltételezve kiszámítható, hogy a folyamat $2,4 \times 10^{18}$ kg oxigént fogyasztott. Ha ehhez hozzávesszük a víz disszociációjával keletkezett hidrogén oxidációját, akkor végeredményül $3,6 \times 10^{18}$ oxigénvesztéget kapunk (1. táblázat).

A vulkanikus gázok szén-dioxidot, és kisebb mennyiségben szén-monoxidot tartalmaznak. A két gáz közötti arányt, valamint a kőzetek szénmennyiségét (szén mint kémiai elem) figyelembe véve adódik, hogy a szén-monoxid teljes oxidációja $2,2 \times 10^{18}$ kg oxigént vont ki a légkörből. Vulkanitörések alkalmával továbbá mind kén-dioxid, mind kénhidrogén kerül a légkörbe. A kibocsátott két gáz arányának megbecslése nem könnyű feladat, mivel értéke a környezet oxidációs képességének a függvénye. Ha feltételezzük, hogy a Föld története során a kénhidrogén volt a meghatározó vegyület, akkor kiszámítható, hogy a kénhidrogén 15×10^{18} kg O_2 oxidálta. Az oxidációs termékek minden bizonnyal végül is szulfátartalmú vegyületekbe kerültek.

További oxidációs folyamatot jelent a légkörrel érintkező vulkanikus kőzetekben a vas(II)-oxid (FeO) vas(III)-oxidá (Fe_2O_3), hematitá alakulása (a zárójeles római számok az oxidációs fokra utalnak). A folyamat a két vegyület kőzetekben előforduló aránya alapján becsülhető meg. Az arány egyes kőzetekben különböző (1,6% és 3,5% között változik). Megbízható középértékének meghatározása ezért nem könnyű feladat. A legelfogadot-

	oxigéntömeg (10^{18} kg)
keletkezés	
fotoszintézis	32,0
víz felbomlása	1,9
összeg	33,9
fogyasztás	
hidrogén oxidációja	3,6
CO_2 oxidációja	2,2
kénhidrogén oxidációja	15,0
redukált vas oxidációja	9,9
szabad oxigén	1,2
összeg	31,9

1. táblázat • A Föld története során keletkezett oxigén forrásai és nyelői (Warneck, 1999)

tobb számítások alapján a folyamat a Föld története során közel 10×10^{18} kg oxigént fogyasztott.

Az 1. táblázatot áttekintve láthatjuk, hogy a források és nyelők erőssége, a becslések bizonytalansága ellenére, hibahatáron belül megegyezik. Meglepő, hogy az oxigén többsége jelenleg szulfátok formájában tárolódik, nagy részben a tengervízben oldva, ionok formájában. Másik része az agyagpalában vas-szulfidként fordul elő. Ugyanakkor jelentős az az oxigénmennyiség is, amely a vas oxidációjára fordítódott. A táblázatból az is kitűnik, hogy a fotoszintézissel keletkezett oxigénnek milyen kis része van jelenleg szabad formában. Ez a rész azonban döntően meghatározza a földi környezetet. A szabad oxigén zömmel a levegőben mutatható ki, és csak kis része található az óceánvízben (a légkör hetvenszer annyi oxigént tartalmaz, mint az óceánok).

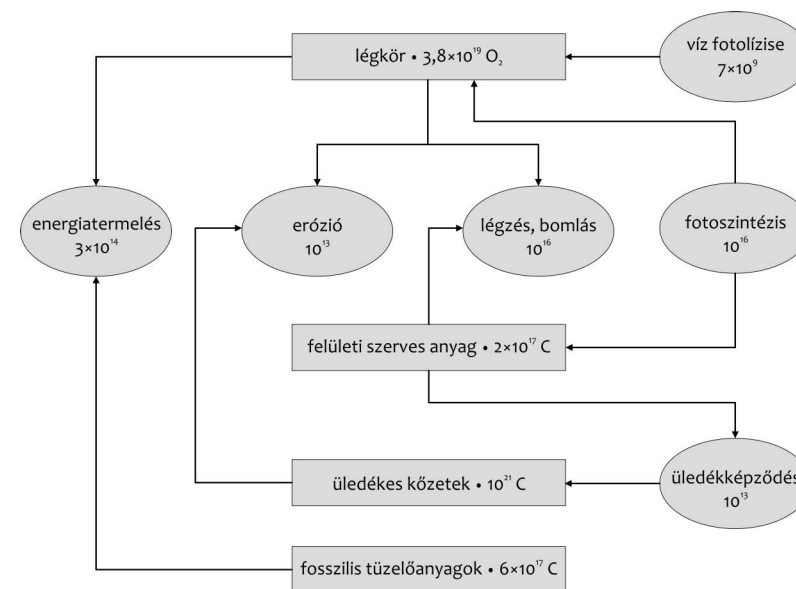
	tömeg (kgC)	termelés (kgC/év)	termelés (molC/év)
szárazföld	$5,6 \times 10^{14}$	$6,0 \times 10^{13}$	$0,50 \times 10^{16}$
óceán	$3,0 \times 10^{12}$	$5,0 \times 10^{13}$	$0,42 \times 10^{16}$

2. táblázat • A növények tömege és produktivitása (biomassa-termelése) a Földön (Jacobson et al., 2000)

Jelen és jövő: oxigén

Vizsgáljuk meg ezek után az oxigén jelenlegi körforgalmát (1. ábra) James C. G. Walker (1977) elképzelései szerint. Mint az előzőekben láttuk, a szén és az oxigén ciklusa szorosan kapcsolódik egymáshoz, ezért az ábrán a szén földi áramlásának főbb jellegzetességeit is feltüntettük. A két elem összehasonlíthatósága érdekében az értékek mólokban, illetve mol/év egységekben vannak feltüntetve. Az ábrán a négyzetek az egyes földi tartományokat (tározókat), míg a körök a tartományok közötti anyagcserét, fluxusokat ábrázolják.

A fotoszintézis által termelt szerves szén, illetve oxigén fluxusának meghatározása a növények tömegéből kiindulva történik. A 2. táblázatból látható, hogy az óceáni növények (fotoszintetizáló) tömege jóval kisebb, mint a szárazföldi növényeké. Ennek ellenére a szárazföldi és óceáni növények biomassza-termelése összevethető egymással. A termelt, kerekén 10^{16} mol szerves szén a „felületi szerves anyagok” elnevezésű tározóba kerül. A fotoszintézis során természetesen ugyanannyi mol oxigén keletkezik, mint szerves szén. Ebből következik, hogy a szabad oxigén közel fele az óceánokból szabadul föl. A



1. ábra • Az oxigén körforgalma James Walker (1977) nyomán. Az ábrán a környezeti tározók (téglalapok) mólokban, a fluxusok (körök) mol/év-ben vannak kifejezve.

bomlás és kisebb mértékben a légzés a levegőből a keletkezett szerves anyagoknak megfelelő oxigént von ki: kiegyenlíti a fotoszintézis hatását. Az oxigén szempontjából tehát a fotoszintézis és bomlás zárt ciklust alkot.

Az 1. ábrából kitűnik, hogy az üledékes kőzetekbe kerülő szerves szén és a mállás során a levegőt elhagyó oxigén fluxusa nagyságrendekkel kisebb, mint a fotoszintetizáló növények O_2 -termelése. Nem kell azonban elfelejtenuünk, hogy a légköri oxigén mennyiségét az üledékképződés sebessége szabályozza. Ez az egyetlen folyamat a körforgásban, amely függ az oxigén nyomásától. Minél kisebb az oxigén nyomása, annál több szerves anyag temetődik el az üledékben, következésképpen annál több oxigén kerül a levegőbe. Végül némi oxigén a víz magaslégtörési felbomlása miatt is keletkezik. Ez a mennyiség azonban nagyságrendekkel kisebb, mint a bioszférából felszabaduló O_2 tömege.

A levegőben a különböző széntározókhoz képest sok oxigén található. Ez alól az üledékes kőzetek jelentik a kivételt. Az üledékes kőzetek lassítják a szén földi áramlását, hiszen egy szénatom átlagosan egymillió évig tartózkodik ebben a tározóban.⁵ Ezzel szemben az oxigén tartózkodási ideje a légkörben 3800 év. A légkörben jóval több oxigén van, mint ahány mol szén a felületi szerves anyagok tározójában található, amely számunkra a táplálkozáshoz szükséges szerves tápanyagokat biztosítja. Az ábrán feltüntetett számadatakból következik, hogy benne a tartózkodási idő mindössze húsz év. Más szavakkal, ha a fotoszintézis valamilyen ok miatt megszűnne, akkor nem megfulladna, hanem húsz év múlva éhen halna az emberiség. Oxigén vi-

szont még hatalmas mennyiségben maradna utánunk.

A következő feltételezés már nincs is olyan messze a valóságtól. Az ember ugyanis kitermeli a fosszilis tüzelőanyagokat; úgy mond, *mobilizálja* azt a széntározót, amely természetes körülmények között a ciklusban már nem vesz részt. Ismeretes, hogy a fosszilis tüzelőanyagok (szén, olaj, földgáz) a geológiai múltban eltemetődött növényekből keletkeztek, és magukba zárták azt a napenergiát, amelyet életük során felhasználtak. Az ember ezt az energiát szabadítja föl, amikor a tüzelőanyagokat elégeti, oxidálja. A jelenlegi kitermelés 3×10^{14} mol szénegyenértékkel egyenlő.⁶ Ez hatalmas mennyiségnek tűnik, a levegőben lévő oxigén tömegéhez képest azonban elhanyagolható. Így, ha feltételezzük, hogy az összes tüzelőanyagot felhasználnánk, a légköri oxigénből akkor is csak kb. 2%-ot fogyasztanánk. Ugyanakkor (ezt az ábra nem mutatja) a levegő szén-dioxid-koncentrációja tízszeresére növekedne. Tekintve, hogy a szén-dioxid üvegházhatású gáz, ennek az éghajlatra drasztikus hatása lenne, a bolygó jelentősen felmelegedne, ami veszélybe sodorná a jelenlegi bioszféra egy részét, így az emberi fajt is. Bár itt még nem tartunk, az emberi tevékenység miatti globális felmelegedés a környezetvédelemnek máris fontos problémája.

Argon és nitrogén

A Föld légkörében 0,93 térfogatszázalékban előforduló argon nem a kozmikus gázok maradványa. A kálium-40-ből elektronbefogással keletkezik. A kálium-40-re vonatkozó geológiai adatokból, valamint az izotóp felezési idejéből kiszámítható, hogy napjainkig

összesen $1,35 \times 10^{17}$ kg argon-40 keletkezett (Warneck, 1999). Jelenleg a légkörben $0,675 \times 10^{17}$ kg argon található. Ebből az következik, hogy a nemesgáz fele a földköpenyben tárolódik. A légköri argon keletkezési sebessége elvileg kiszámítható, ha a légköri mennyiséget elosztjuk a Föld korával. Az eredmény $3,3 \times 10^{10}$ kg/év. Ez azonban egy fiktív érték, hiszen a forrás erőssége a kálium-40 fogyasztásával egyre kisebb lett. Ezért ma már az argont „állandó” összetevőnek tekintjük. Az argonnak nincsenek a Földön nyelői. Így a Föld története során mennyisége lassan emelkedett, hogy elérje a jelenlegi kvázi állandó értéket.

A molekuláris nitrogén a földi légkör legnagyobb térfogati arányban (kerekén 78%) előforduló összetevője, így jelentősen meghatározza (és a múltban meghatározta) a légkör nyomását. Mint említettük a nitrogén a korai gázfelszabadulás terméke, és már az őslégkörben a maihoz hasonló mennyiségben volt jelen. A Föld történetének nagy részében légköri tömege nem változott. Ez nem jelenti azt, hogy a nitrogénmolekulák nagyon lassan ne cserélődjenek a földi tartományok között. Így a vulkanikus tevékenység során felszabaduló mennyiségnek megfelelő N_2 az óceánokban a fenékre ülepedő elhalt szervezetekkel az üledékbe, majd az üledékes kőzetekbe jut. Jelenleg a légköri nitrogén lassú ciklusát elsősorban a bioszféra működteti. Így a szárazföldi és óceáni fotoszintetizáló szervezetek (a kultúrnövényeket nem tekintve) évi $(150-250) \times 10^9$ kg nitrogént kötnek meg (Jacobson et al., 2000), amely denitrifikációval kerül vissza a levegőbe. Ez a mennyiség azonban igen kicsi a légköri nitrogén tömegéhez képest: $3,9 \times 10^{18}$ kg. Az értékeket összevetve kiszámítható, hogy a nitrogén természetes tartózkodási ideje mintegy 20 millió évvel egyenlő. A nitrogén körforgalmát az emberi tevékenység

is befolyásolja. Ha a mezőgazdasági és ipari nitrogén megkötését kivonjuk a műtrágyázás miatt denitrifikációval felszabaduló nitrogén tömegéből, akkor azt kapjuk, hogy az emberi tevékenység évente kb. 100×10^9 kg-mal csökkenti a légköri nitrogén mennyiségét. Ez jelentős a fluxusok értékéhez képest, de elhanyagolható a teljes légköri tömeghez viszonyítva. Hangsúlyoznunk kell, hogy ezek a megállapítások a molekuláris nitrogénre (N_2) vonatkoznak, és nem érintik a nyomanyagként kimutatható nitrogénvegyületeket (ammónia, nitrogén-oxidok, dinitrogén-oxid), amelyek mennyiségét az ember máris jelentősen módosította.

Összefoglaló megjegyzések

A földi légkör történetéből a következő fontos események emelhetők ki.

- A Föld életének első szakaszában a Föld belsejéből nagy mennyiségű vízgőz, nitrogén és szén-dioxid szabadul föl. A víz óceánokká kondenzálódik, a nitrogén a légkörben marad, míg a szén-dioxid többsége fokozatosan a karbonátos kőzetekbe kerül, a légkörben nyomanyaggá válik.
- Az oxigénmentes őslégkörben 3,5 milliárd évvel ezelőtt a cianobaktériumok fotoszintézisükhöz hidrogéndonorként a vizet használják: megjelenik az oxigén.
- Mintegy kétmilliárd éve a légkör oxigénkoncentrációja 0,1%. Ebben az időszakban hirtelen felgyorsul az oxigéntermelés.
- 600 millió éve az oxigén légköri tömege a jelenleginek 1–10%-a között van: az óceáni bioszféra látványos fejlődésnek indul. A szén-dioxid mennyisége közelíti a jelenlegi értéket.
- 500 millió éve az oxigén koncentrációja meghaladja a mai érték 10%-át, kialakul a felszint az UV sugaraktól védő ózonré-

⁵ A tartózkodási idő úgy kapható meg, ha elosztjuk a tározóban lévő tömeget a fluxus értékével.

⁶ Sajnos a magyar nyelvben ugyanazt a szót használjuk a szénre mint kémiai elemre és mint tüzelőanyagra.

teg, a szárazföldek készen állnak az élet befogadására.

- 300 millió évvel ezelőtt az oxigén aránya eléri a jelenlegi értéket, kialakul az a légkör, a levegő, amit mi is ismerünk.
- Jelen: az emberi tevékenység a fosszilis tüzelőanyagok felhasználásával a széndioxid mennyiségét jelentősen módosít

ja, de lényegében hatástalan az oxigén tömegére. Hasonló módon az ipari és mezőgazdasági tevékenység nem változtatja meg észrevehetően a levegő molekuláris nitrogéntartalmát.

Kulcsszavak: *Föld története, légkör története, oxigén, nitrogén, szén-dioxid, argon*

IRODALOM

- Géczy Barnabás (1984): A Burgess-pala különös állatvilága. *Természet Világa*. 115, 457–461.
- Gradel, Thomas E. – Crutzen, Paul J. (1993): *Atmospheric Change. An Earth System Perspective*. New York: W. H. Freeman and Company
- Holland, Heinrich D. (1984): *The Chemical Evolution of the Atmosphere and Oceans*. Princeton, NJ, Princeton University Press
- Jacobson, Michael C. – Charlson, Robert J. – Rodhe, Henning – Orians, Gordon H. (eds.) (2000): *Earth System Science*. Volume 72. *From Biogeochemical Cycles to Global Change*. San Diego: Academic Press
- Kasting, James F. (1993): Earth's Early Atmosphere. *Science*, 259, 920–926. • http://www.wdca.iag.usp.br/www/material/fornaro/ACA410/Kasting%201993_EarthEarlyAtmos.pdf

- Lovelock, James E. (1979): *Gaia. A New Look on Life on Earth*. Oxford: Oxford University Press
- Margulis, Lynn (2000): *Az együttélés bolygója*. (ford. Schoket Zsófia) Budapest: Vince Kiadó
- Mészáros Ernő (2008): *A levegő megismerésének története. (Természettörténelem 2)* Budapest: MTA Történettudományi Intézet
- Miller, Stanley L. (1953): Production of Amino Acid under Possible Primitive Earth Conditions. *Science*. 117, 528–529. DOI: 10.1126/science.117.3046.528 • <http://tinyurl.com/jjkf3fs>
- Möller, Detlev (2014): *Chemistry of the Climate System*. Berlin–Boston: De Gruyter
- Walker, James C. G. (1977): *Evolution of the Atmosphere*. New York: Macmillan Publishing
- Warneck, Peter (1999): *Chemistry of the Natural Atmosphere*. San Diego: Academic Press



Tudós fórum

KITÜNTETÉSEK, KOSSUTH-DÍJAK, SZÉCHENYI-DÍJAK 2017. MÁRCIUS 15-ÉN

Nemzeti ünnepünk, március 15-e alkalmából az Országházban Áder János köztársasági elnök magas kitüntetésekkel adta át. A díjazottak között számos tudós is volt.

KOSSUTH-NAGYDÍJAT kapott

Kallós Zoltán Kossuth-díjas néprajztudós, népzeneegyűjtő, a Nemzet Művésze.

SZÉCHENYI-DÍJASOK

- Ádám József** geodéta, az MTA rendes tagja, a BME Építőmérnöki Kara Általános és Felsőgeodézia Tanszékének egyetemi tanára;
- Bogárdi Szabó István**, a Dunamelléki Református egyházkerület püspöke, a Magyarországi Református Egyház Zsinatának lelkes elnöke, a Károli Gáspár Református Egyetem Hittudományi Karának egyetemi tanára;
- Bollobás Béla** matematikus, Fellow of the Royal Society, az MTA külső tagja, a University of Cambridge professzora, a University of Memphis címzetes professzora;
- Dóczi Tamás Péter** orvos, idegsebész, az MTA rendes tagja, a Pécsi Tudományegyetem Általános Orvostudományi Kara Idegsebészeti Klinikájának egyetemi tanára, az MTA–PTE Klinikai Idegtudományi Képző Kutatócsoport vezetője;

Frei Zoltán asztrofizikus, az MTA doktora, az ELTE Természettudományi Kar Fizikai Intézete Atomfizikai Tanszékének tanszékvezető egyetemi tanára, az MTA–ELTE Lendület Asztrofizikai Kutatócsoportjának vezetője;

Hangody László ortopéd sebész, traumatológus, az MTA levelező tagja, a Semmelweis Egyetem Általános Orvostudományi Kara Traumatológiai Tanszékének tanszékvezető egyetemi tanára;

Kertész András Lajos nyelvész, az MTA rendes tagja, a Debreceni Egyetem Bölcsészettudományi Kara Német Nyelvészeti Tanszékének egyetemi tanára, az Academia Europaea tagja;

Kósa László etnográfus, történész, az MTA rendes tagja, az ELTE Bölcsészettudományi Kar Történeti Intézete Művelődéstörténeti Tanszékének professor emeritusa;

Losonczi Ágnes, a szociológiai tudomány doktora, az MTA Társadalomtudományi Kutatóközpontja Szociológiai Intézetének nyugalmazott tudományos tanácsadója;

Némethi András matematikus, az MTA doktora, az MTA Rényi Alfréd Matematikai Kutatóintézete Algebrái Geometria és Differenciáltopológia Osztályának vezetője, az ELTE Természettudományi Kar