

FEJEZETEK AZ ÜVEGHÁZHATÁS-KUTATÁS TÖRTÉNETÉBŐL

HIGHLIGHTS FROM THE HISTORY OF GREENHOUSE EFFECT RESEARCH

Haszpra László

az MTA doktora

Atommagkutató Intézet, Debrecen, Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, Sopron

haszpra.l@gmail.com

ÖSSZEFOGLALÁS

A 19. század első felében egyértelművé vált, hogy a légkör meghatározó szerepet játszik a Föld éghajlatának alakításában. A század közepére, második felére tisztázódott, hogy a légkör hőviszogatartó képessége főleg a vízgőznek és a szén-dioxidnak köszönhető, és ezek mennyiségének megváltozása a Föld éghajlatának megváltozását eredményezi. Az ipari tevékenység már ekkor is tudottan jelentős mennyiségű szén-dioxidot bocsátott a levegőbe, így a 19–20. század fordulóján felmerült, hogy a széntüzelés idővel módosíthatja a bolygó éghajlatát. Az első próbálkozások az emberi tevékenység éghajlat-befolyásoló hatásának kimutatására az 1930-as években megtörténtek, annak egyértelmű bizonyítására azonban, hogy a légkörben a szén-dioxid valóban felhalmozódik, és ez döntően az emberi tevékenység következménye, a 20. század közepéig kellett várni. A tanulmány a légköri üvegházhatás-kutatás néhány, szélesebb körben talán kevésbé ismert epizódját villantja fel. A tudománytörténeti visszatekintés egyben ráveteti az olvasót arra, hogy napjaink éghajlatkutatásának már nem elsősorban a jelenlegi éghajlatváltozás okát kell keresnie, hanem azt, hogy a légköri energetikai kényszerre a rendkívül komplex éghajlati rendszer milyen ütemű és mértékű változással reagál.

ABSTRACT

In the first half of the 19th century, it became clear that the atmosphere plays a crucial role in governing the Earth's climate. By the middle and second half of the century, it was clear that the atmosphere's ability to retain heat was mainly due to water vapor and carbon dioxide, and that changes in their quantity would lead to changes in the Earth's climate. Even then, industrial activity was already known to emit significant amounts of carbon dioxide, and at the turn of the 19th century to the 20th, it was suggested that coal combustion could change the planet's climate over time. The first attempts to demonstrate the climate-changing effects of human activity were made in the 1930s, but it was not until the mid-20th century that there was clear evidence for carbon dioxide accumulating in the atmosphere, largely as a result of human activity. This paper highlights some of the perhaps less widely known episodes in atmospheric greenhouse research. This historical review of science also makes the reader aware that today's climate research is no longer primarily concerned with the causes of current climate change, but with the rate and extent to which the highly complex climate system is responding to the atmospheric energy forcing.

Kulcsszavak: tudománytörténet, éghajlatváltozás, üvegházhatás

Keywords: history of science, climate change, greenhouse effect

A KEZDETEK

Már a 17. században felismerték, hogy a fényvel érkező „látható” hő áthatol az átlátszó/áttetsző anyagokon, míg a meleg testek által fény nélkül kibocsátott „láthatatlan” hő nem. Tapasztalat volt, hogy a nem átlátszó testek a „látható” hőt (például: napfény, tűz) „láthatatlan”, csak a hőmérsékleten keresztül érzékelhető hővé alakítják. A hőnek ez a tulajdonsága hőcsapda készítésére is felhasználható, ahogy ezt Horace-Bénédict de Saussure (1740–1799) svájci természettudós bizonyította. Üvegtetejű, sötét belsejű, egymástól jó hőszigetelő anyaggal elválasztott dobozokat helyezett egymásba, és napfényre téve a legbelső dobozban a víz forráspontját is meghaladó hőmérsékletet ért el (Bard, 2004). A napfény által hordozott „látható” hő bejutott az üvegen keresztül, de a „láthatatlan” hő már nem tudott távozni, ami a környezethez képest megemelte a dobozban a hőmérsékletet.

A kalandos életű francia matematikus-fizikus, Jean-Baptiste Joseph Fourier (1768–1830) a 19. század elejének egyik legnagyobb hatású tudósa volt. Élete jelentős részében a hővezetéssel foglalkozott, ennek leírására dolgozott ki matematikai módszereket. 1822-ben jelent meg legjelentősebb munkája, *A hő analitikai elmélete* (Théorie analytique de la chaleur) (URL1). Fourier-t a kezdetektől különösen foglalkoztatta a Föld hőmérséklete, ezért ennek a témának két évvel később külön dolgozatot is szentelt *Általános megjegyzések a Föld és a bolygók hőmérsékletéről* (Remarques generales sur les temperatures du globe terrestre et des espaces planetaires) címmel (URL2). Ennek némileg átdolgozott változatát 1827-ben jelentette meg: *Értekezés a Föld és a bolygók hőmérsékletéről* (Mémoire sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires) (URL3).

Fourier alapvetően hővezetéssel foglalkozott. Helyesen állapította meg, hogy a Föld belső hője jelentéktelen szerepet játszik a felszín hőmérsékletének alakításában. Azt is megállapította, hogy a légkör nélkül a Föld az élő szervezetek számára elviselhetetlenül nagy hőmérséklet-ingadozásnak lenne kitéve a nappalok és az éjszakák váltakozása során, hiszen a csillagokból érkező hő csak a „sarkvidékinél is alacsonyabb” hőmérsékletet tenne lehetővé. Felidézve Saussure hőcsapdját, úgy gondolta, hogy talán a légkör egyes rétegei hasonlóan viselkednek, mint az üveglapok Saussure dobozain, nem engedve nagyon lehűlni a „legbelső dobozt”, a földfelszínt. Tisztában volt azonban azzal, hogy az analógia sántít, hiszen a

léggör nem szilárd közeg, benne a hőmérsékleti rétegződés hatására a kialakuló sűrűségkülönbség miatt függőleges mozgások indulnak meg. Fourier megközelítésének tulajdonképpen kevés köze volt a légköri üvegházhatáshoz, inkább egyfajta hőszigetelésre gondolt, ezért nem feltétlenül indokolt őt tekinteni ennek az éghajlat-szabályozásban meghatározó fontosságú jelenség első felvetőjének. Csak a későbbi, Fourier-re hivatkozó szerzők értelmezték úgy a munkáját, mintha abban már megjelent volna a légköri üvegházhatás abban a formában, ahogyan ezt a fogalmat a későbbiekben használni kezdték. Ami tény, Fourier felismerte azt, hogy a Föld éghajlatának alakításában a légkörnek valamilyen módon meghatározó szerepe van.

Részben Fourier nyomdokain haladva, az ugyancsak francia Claude Servais Mathias Pouillet (1790–1868) a maga által kifejlesztett pirheliométer segítségével már meg tudta mérni a Naptól érkező energiát, és 1838-ban megjelent *Értekezés a nap hőjéről, a levegő sugárzó és elnyelő képességéről, valamint a világűr hőmérsékletéről* (Mémoire sur la chaleur solaire, sur les pouvoirs rayonnants et absorbants de l'air atmosphérique et sur la température de l'espace [URL4]) című munkájában kifejtette, hogy a légkör átlátszóbb a Naptól érkező sugárzásra, mint a földfelszín kisugárzására, így a bolygó melegebb, mint légkör nélkül lenne (Bard, 2004).

A 19. század első felében egyértelművé vált, hogy a Naptól érkező hő mellett a légkör is meghatározó szerepet játszik a Föld éghajlatának alakításában. Az a kérdés viszont még megválaszolatlan volt, hogy mi a jelenség fizikai magyarázata.

AZ ÉGHAJLAT-SZABÁLYZÓ GÁZOK FELFEDEZÉSE

Az 1840-es évektől egyre inkább elfogadottá vált Jean Louis Rodolphe Agassiz (1807–1873) svájci (később az Amerikai Egyesült Államokban tevékenykedő) biológus-geológusnak, a Magyar Tudományos Akadémia későbbi tiszteleti tagjának (1863) felismerése, mely szerint a bolygót a múltban nagy kiterjedésű gleccsek borították. Más geológiai leletek azt mutatták, hogy voltak olyan időszakok is, amikor melegkedvelő növényzet borította a magasabb földrajzi szélességeken elterülő területeket. A kutatási eredmények alapján elfogadottá vált, hogy a Föld éghajlata nem állandó, valamilyen folyamat, tényező azt változtathatja.

A 19. század első felében a spektroszkópia is jelentős fejlődésen ment keresztül. A kutatók a legkülönbözőbb anyagok kibocsátási és elnyelési tulajdonságait kezdték vizsgálni, amelyek később elvezettek a sugárzási törvényszerűségek felismeréséhez is. A légköri energiaelnyelés kapcsán többnyire John Tyndall (1820–1893) angol–ír fizikus munkáit hivatkozzák, aki 1861-ben Baker-díjasként a Royal Societynek ismertethette kilenc gáz és húsz gőz hősugárzás-elnyelésére vonatkozó vizsgálatait (Tyndall, 1861). Tyndall hivatkozott munkája alapvetően

technikai jellegű. A kísérleti berendezés felépítésével, tesztelésével, a mérések során felmerülő problémákkal foglalkozik, emellett táblázatos formában közli mérései eredményeit. A vízgőzre, a szén-dioxidra (a korabeli szóhasználatban: szénsav) és a vizsgált szénhidrogénekre vonatkozó eredményekhez azonban a légkörrel kapcsolatban egy pár mondatos értelmezést fűzött:

„De Saussure, Fourier, M. Pouillet és Hopkins a földi kisugárzás ezen feltartóztatását az éghajlatot befolyásoló legfontosabb hatásnak tekinti. Nos, mivel a fenti kísérletek azt mutatják, hogy a fő hatást a vízgőz gyakorolja, ennek az alkotóelemnek minden változása éghajlatváltozást kell eredményezzen. Ugyanez a helyzet a levegőben szétoszló szénsavval is. Továbbá, bármilyen szénhidrogén-gőz jelentéktelen mennyiségű bekeveredése is nagy hatással lenne a földi kisugárzásra, és ennek megfelelően éghajlatváltozást eredményezne. Ezért nem szükséges feltételeznünk a légkör sűrűségének és magasságának megváltozását ahhoz, hogy megmagyarázzuk, miért őrzött meg a Föld eltérő mennyiségű hőt az idők folyamán; ehhez elegendő a változó alkotóelemek enyhe megváltozása. Valójában az ilyen változások idézhették elő az éghajlat minden olyan változatát, melyeket a geológusok kutatásai feltártak.” (Tyndall, 1861, 28–29.)¹

További két, légköri vízgőzzel foglalkozó munkájában a vízgőz hőviszatarató tulajdonságával magyarázza a különösen száraz levegőjű területek erőteljes éjszakai lehülését, illetve feltételezi, hogy az emelkedő levegő lehülése nemcsak a tágulásának köszönhető, hanem annak is, hogy a felette lévő ritkább levegő már kevésbé akadályozza a hő távozását a világűr felé. Tyndall a vízgőzt egyfajta gáthoz hasonlította, amely meghatározott szintig felduzzasztja az alatta lévő légrétegben a hőt, míg a többlet átbukik a gáton és a világűr felé távozik: „The aqueous vapour constitutes a local dam, by which the temperature at the earth’s surface is deepened: the dam, however, finally overflows, and we give to space all that we receive from the sun.” (Tyndall, 1863, 205.) A „túlfolyó” biztosítja, hogy végül annyi energia távozzon a bolygóról, mint amennyi érkezik. A szén-dioxid és a szénhidrogének légköri szerepével az 1861-es, már idézett munkájában szereplő egyetlen bekezdésen túlmenően Tyndall nem foglalkozott.

Thomas Sterry Hunt (1826–1892) kanadai geológus azonban felismerte Tyndall felfedezésének jelentőségét. Azt korábban is feltételezték, hogy a szén- és kőolajtelepek a földtörténeti múlt vegetációjából képződtek. A növények fotoszintézise révén a szén és szénzármazékok közvetetten a hajdani légkör szén-dioxidjából képződtek. Tyndall felfedezésével pedig magyarázatot nyert, legalábbis hipotézis szintjén, hogy a többlet szén-dioxidnak lehetett köszönhető az a melegebb, és ennek következtében nedvesebb éghajlat, amely bizonyos földtörténeti korok dús vegetációját táplálta (Hunt, 1863). Burkoltan már itt megjelent az, amit ma vízgőz-visszacsatolásnak hívunk: a melegebb éghajlat egyben magasabb légköri

¹ A szerző fordítása.

vízgőztartalmat eredményezhetett, ami maga is hozzájárult a felszíni hőmérséklet megemeléséhez.

Valójában nem Tyndall volt az első, aki a légköri vízgőz és szén-dioxid hőelnyelő tulajdonságát felismerte. Eunice Foote (1819–1888), amatőr kutató már az 1850-es években vizsgálta a száraz levegő, a nedves levegő és a légkörben régóta tudottan jelen lévő szén-dioxid sugárzáselnyelését, valamint az elnyelés nyomásfüggését. A napfényt használta energiaforrásként és hőmérséklet-méréssel detektálta az eltérő elnyelést. Megállapította, hogy amennyiben szén-dioxidból a jelenleginél több keveredik a légkörbe, az a hőmérséklet emelkedését kell hogy okozza. Eredményeit a ma is tevékeny Amerikai Egyesület a Tudományos Haladásért (American Association for the Advancement of Science – AAAS) 1856. évi konferenciáján kívánta bemutatni. Bár az egyesületnek 1850-től már nők is tagjai lehettek, Foote nem volt tag, ezért dolgozatát a Smithsonian Institution vezetője olvasta fel. Az eredmények nyomtatásban is megjelentek az egyesület lapjában (Foote, 1856). Tekintettel az internet, a telefax és a légiposta korabeli hiányára, a 19. század közepén a tudományos eredmények még csak szörványosan és lassan jutottak át az óceánon. Sir Roland Jackson, a brit The Royal Institution Tyndall-kutatója szerint nagyon valószínű, hogy Tyndall nem tudott Foote vizsgálatairól, tőle függetlenül következett a vízgőz és a szén-dioxid éghajlat-befolyásoló hatására (Jackson, 2019).

Foote ténylegesen nem a földfelszín hőmérsékleti kisugárzásának, hanem a Nappól érkező közeli infravörös sugárzásnak az elnyelését vette észre, és sem ő, sem Tyndall nem ismerte fel az üvegházhatás lényegét, a légköri visszasugárzást.

SVÉD TUDÓSOK AZ ÉGHAJLATVÁLTOZÁS NYOMÁBAN

A 19. század második felének földtudományi kutatásai között jelentős helyet foglalt el a földtörténeti éghajlatváltozások vizsgálata, a meleg időszakok és a jégkorszakok okainak feltárása. A korabeli csillagászati hipotézisek nem voltak meggyőzők, ezért a kutatások elsősorban az éghajlatot bizonyosan befolyásoló légkör esetleges változásaira, ezek lehetséges okaira, illetve hatásaira irányultak. Svante August Arrhenius (1859–1927) svéd fizikus-kémikust is a jégkorszakok okainak feltárása inspirálta arra, hogy a korábbi, pusztán hipotetikus felvetések után megpróbálja ténylegesen is kiszámolni, milyen mértékű szén-dioxid-mennyiség csökkenése, illetve növekedése mellett alakulhattak ki ezek a fagyos, illetve meleg periódusok.

Mai szóhasználattal Arrhenius modellje egy nulladimenziós energia-egyensúlyi modell volt, amelyben a felszín hőmérséklete lényegében csak a légkör hosszúhullámú átbocsátó képességétől függött (Arrhenius, 1896). A cél nem a felszíni hőmérséklet kiszámítása volt, erre a modell nem is lett volna alkalmas, hanem a geológusok által becsült éghajlatváltozások előidézéséhez szükséges

szén-dioxid-mennyiség változásának meghatározása. A vízgőz mindenkori légköri mennyiségét Arrhenius logikus módon a kialakuló hőmérséklethez kötötte a relatív nedvesség rögzítésével, így a modellben a vízgőz-visszacsatolást figyelembe vette. A jégborítottság változásával járó albedóváltozással, bár a jelenségre az eredmények értékelésénél utalt, nem tudott számolni. Arrhenius számításai szerint mintegy 40%-kal kellett alacsonyabbnak lennie a légkör szén-dioxid-koncentrációjának az általa aktuálisként ismert 0,03%-nál (300 ppm) a jégkorszakok idején, míg a meleg időszakok 8-9 fokkal magasabb hőmérsékletéhez 2,5-3-szoros koncentráció tartozhatott (Arrhenius, 1896). Kortársa, Nils Ekholm (1848–1923) svéd meteorológus továbbgondolta Arrhenius eredményeit, és felvetette, hogy a széntüzelés révén a légkörbe kerülő nagy mennyiségű szén-dioxid a bolygó melegegését okozhatja (Ekholm, 1901). Arrhenius saját, ezzel kapcsolatos gondolatait a magyarul is megjelent *A világok keletkezése* (Worlds in the Making) című könyvében fejtette ki (Arrhenius, 1908). Mint a hűvös, skandináv éghajlat alatt élő tudós, úgy gondolta, némi melegegés egyáltalán nem ártana. Kellemeesebbé tenné az éghajlatot, növelné a mezőgazdasági terméshozamokat. A minden bizonnyal ismét közeledő jégkorszak elkerülésével pedig nem kényszerülnének az északi népek arra, hogy Afrika melegebb éghajlatú területeire vándoroljanak. Ugyanakkor úgy becsülte, az észrevehető melegegésig évszázadok telnének el, mivel az ipar által kibocsátott szén-dioxid 5/6-át a gáz jó oldhatósága miatt az óceánok elnyelnék, így légköri hatást nem fejthetne ki (Arrhenius, 1908). Bár egy egyensúlyi rendszerben Arrhenius becslése nagyjából megállná a helyét, a valóság dinamikus rendszer, ahol a folyamatok sebességével is számolnunk kell. Az óceán nem feltétlenül képes olyan ütemben felvenni a szén-dioxidot, amilyen ütemben a légkörbe kerül. Ha a kibocsátás üteme meghaladja a felvételt (ez volt a helyzet már Arrhenius idején, és ez a helyzet jelenleg is), akkor megindul a légköri felhalmozódás, és így sokkal erősebb az éghajlati hatás, mint amit egyensúlyi esetre számolnánk. Bár Arrhenius volt az, aki először próbálta kiszámítani, hogy a légköri szén-dioxid-mennyiség megváltozása milyen mértékű hőmérsékletváltozást okoz (1896), Ekholm volt az, aki a fent idézett munkájában (1901) az emberi tevékenység potenciális éghajlat-változtató hatására felhívta a figyelmet. Ennek ellenére manapság a legtöbb publikáció Arrhenius 1896-os munkáját jelöli meg az antropogén éghajlat-változtatás első felvetéseként.

A légköri szén-dioxid és vízgőz éghajlati szerepének vizsgálatában fordulópontot jelentettek Knut Ångström (1857–1910) svéd fizikus spektroszkópiai mérései. Ezek azt mutatták, hogy a légköri szén-dioxid-tartalom olyan nagy, hogy felezése vagy duplázása a felszín hőmérsékleti kibocsátásának hullámhossztartományában az elnyelésben csupán néhány tized százalékpontos különbséget eredményez. A légkör tehát szén-dioxid tekintetében telítettnek mondható, mennyiségének változása érdemi éghajlatváltozást nem okozhat (Ångström, 1900). Arrhenius ugyan spektroszkópiai, módszertani oldalról támadta Ång-

ström eredményeit, de a döntő probléma nem a mérési eredményekkel, hanem azok értelmezésével volt.

Fourier tisztában volt azzal, hogy a légkör mozgó közeg, amelyben a hó áramlással (is) terjed. Saussure hőcsapdadobozának üvegfedelét, amely megakadályozta a felmelegedett levegő távozását, pusztán hasonlatként használta a légkörre. Követői is tisztában voltak azzal, hogy az üvegház hasonlat fizikailag rossz, mivel az üvegtető elsősorban a levegőcsere megakadályozásával tartja fenn a benti meleget, és kevésbé a hőmérsékleti sugárzás elnyelésével. A hasonlat azonban annyira szemléletes volt, hogy a jelenség lényegével tisztában lévő tudósok gondolkodását is megzavarta. A Pouillet, Tyndall és mások által megfigyelt jelenségek magyarázatához elég volt a légkört egyetlen rétegnek tekinteni, mint az üveglapot. Arrhenius modellje is egyetlen levegőrétegből állt. Ångström azért értelmezhetette félre kísérletei eredményét, mert a légkört ugyancsak egyetlen rétegnek képzelte el, és nem vette észre, hogy éghajlati szempontból nem az az érdekes, hogy a felszínről kiinduló sugárzás közvetlenül áthatol-e a teljes légkörön (ezt mérte a kísérletében), hanem az, hogy az energiaelnyelés és -kisugárzás a légkörön belül hol és hogyan történik.

A felszínről kiinduló hőmérsékleti sugárzást a légkör bizonyos nyomanyagai, elsősorban a vízgőz és a szén-dioxid, elnyelik, majd az elnyelt energiát a molekulák ütközése révén a légkör más alkotóinak is átadják, felmelegítve az adott légréteget. Ez a légréteg ugyancsak hőmérsékleti sugárzást bocsát ki, mind a felszín felé, mind felfelé, amelyet ismét csak elnyelnek az erre képes molekulák. Felfelé haladva azonban az egyre ritkuló légkörben az elnyelési úthossz is egyre nő, a kibocsátott energiának egyre nagyobb hányada el tudja hagyni a bolygót. Bizonyos magasság feletti légrétegekből már annyi energia tud távozni, amennyi – egyensúlyi esetben – megegyezik a Naptól a Földre érkező energia felszín és légkör által elnyelt részével. Ha nő (vagy csökken) a hőmérsékleti sugárzást elnyelő gázok mennyisége a légkörben, akkor ez a kritikus réteg egyre magasabbra (alacsonyabbra), hidegebb (melegebb) régióba kerül. E réteg hőmérsékletének azonban arra a szintre kell emelkednie (süllyednie), hogy a kisugárzott energia ismét egyensúlyba kerüljön a beérkező energiámmennyiséggel, ami a légkörben a konvekció révén kialakuló adiabatikus hőmérsékleti gradiens miatt a felszíni rétegek felmelegedésével (lehűlésével) áll be. Mindezt a kor tudósai is tudták, hiszen a fenti leírás Ekholm 1901-ben megjelent munkájából származik (Ekholm, 1901). A jelenség mai tudásunk szerint valamivel komplexebb (sugárzási és konvektív energiaátvitel, elnyelési sávzélességek nyomásfüggése stb.), de a leírás alapvetően jól tükrözi a valóságot. Megmagyarázza, hogy a koncentráció növekedése miért vonja maga után a felszíni hőmérséklet növekedését. Éghajlati szempontból a légkör nem igazán tud szén-dioxidban telítetté válni, bár a hőmérsékleti hatás a koncentrációnak nem lineáris függvénye. Fura módon a légkör szén-dioxiddal való telítettsége még ma, 120 évvel Ekholm, lényegét tekintve helyes magyarázata után is fel-felbukkan klíma(változás-)szkeptikus körökben.

AZ EMBERISÉG ÉGHAJLAT-MÓDOSÍTÓ HATÁSA

Ångström széles körben ismertté vált – félreértelmezett – kísérleti eredményei, továbbá az a tény, hogy számos hipotézis ellenére a korszak kutatóinak nem sikerült felfedezniük azt a folyamatot, amely meggyőzően magyarázta volna a légkörnek a jégkorszakok ritmusában bekövetkező szén-dioxid-tartalom ingadozását, lényegében fél évszázadra lefékezte a légköri üvegházhatással és az éghajlati hatásokkal foglalkozó kutatásokat. Az éghajlatváltozásokkal kapcsolatos kutatások ismét a csillagászati hatások vizsgálata felé fordultak, ami végül elvezette a munkáját nagyrészt Budapesten végző Milutin Milanković (1879–1958) szerb matematikust a róla elnevezett, az éghajlat alakulásában meghatározó szerepet játszó csillagászati ciklusok felismeréséhez (Szarka et al., 2021). Ma már tudjuk, hogy a légkörben lévő szén-dioxid (és egyéb üvegházhatású gázok) mennyiségváltozásának ténylegesen komoly szerepe volt a jégkorszakok kialakulásában, de nem azon a módon, ahogy ezt a 19. század második felében elképzelték. Az éghajlati rendszerben lévő erős pozitív visszacsatolás miatt a csillagászati okokból bekövetkező besugárzáscsökkenés váltotta ki az üvegházhatású gázok mennyiségének csökkenését, és ez a folyamat lényeges mértékben ráerősített a globális lehülésre (Hansen et al., 2008). A növekvő jégfelület albedónövelő hatása mellett az üvegházhatás gyengülése vezetett a kiterjedt eljegesedésekhez.

1931-ben Edward Olson Hulburt (1890–1982) amerikai geofizikus a sztratoszféra hőmérsékleti viszonyait tanulmányozva vetette fel ismét, hogy a szén-dioxidnak esetleg mégis szerepe lehet a felszíni hőmérséklet alakításában (Hulburt, 1931). Nála már felbukkan mind a sugárzási, mind a konvektív folyamatok egyidejű figyelembevétele. Guy Stewart Callendar (1898–1964) brit gépészmérnök, amatőr meteorológus pedig 1938-ban összefüggést vélt felfedezni a légköri szén-dioxid-koncentráció növekedése és a felszíni hőmérséklet növekedése között (Callendar, 1938). Munkáját erős kételkedéssel fogadták, részint a hőmérsékleti, részint a koncentráció trendek bizonytalansága és némi szakmai sznobizmus miatt. Callendar végzettsége szerint ugyanis mérnök volt, nem „tudós”. Callendar ugyanakkor alapos infravörös spektroszkópiai ismeretekkel rendelkezett. Ismerte Arrhenius és mások munkáit, és a földtörténeti éghajlatváltozásokkal kapcsolatos számtalan feltételezés egyikét sem érezte eléggé meggyőzőnek, ezért fogott önálló kutatásokba (Fleming, 2007). Callendar a légkört már rétegekre bontva, a korábbiaknál lényegesen pontosabb spektroszkópiai adatokra támaszkodva végezte számításait. A hőmérsékleti trendeknél pedig megpróbált figyelni a méréseket esetleg torzító hatásokra, például a városi hőszigetek kialakulására. A nagyjából fél évszázados időszakra számított $0,005\text{ °C/év}$ -es globális hőmérsékleti trendből, számításai szerint $0,003\text{ °C/év}$ -et okozhatott a szén-dioxid-koncentráció növekedése. A tanulmány az 1950-es

évek közepéig visszhangtalan maradt. Számításait azonban az 1950-es években már más kutatók is megerősítették, és mások mellett jelentős szerepe volt abban, hogy az 1957–1958-as Nemzetközi Geofizikai Év keretében megindultak a rendszeres légköri szén-dioxid-mérések.

A HALMOZÓDÓ SZÉN-DIOXID

A lényegében már a századfordulót követően megindult emelkedő hőmérsékleti trend az 1950-es évekre annyira feltűnővé vált, hogy Callendar ismétlődő publikációi alapján egyre többen kezdték újra fontolóra venni a szén-dioxid esetleges éghajlat-módosító hatását. Bár légköri szén-dioxid-méréseket már a 19. század elején is végeztek, a szórványos, analitikai hibáktól és reprezentativitási problémáktól szenvedő adatokból nem igazán lehetett meggyőző tendenciát kimutatni.

Ugyanebben az időben, az 1950-es évek elején a sorozatos légköri nukleáris robbantások szükségessé tették, hogy nyomon kövessék a keletkező, részben radioaktív termékek sorsát, kikerülését a légkörből. Ebben nagy segítséget jelentett az ekkor már üzembiztosan hadra fogható tömegspektrometria, mellyel a különböző izotópok elkülöníthetők voltak.

A légköri nukleáris robbantások egyik jellegzetes terméke a szén 14-es tömegszámú, radioaktív izotópja (^{14}C , radiokarbon). A fák évgyűrűinek elemzése azt mutatta, hogy ennek az izotópnak a bomlási sebességgel korrigált részaránya a fák évgyűrűiben az évszázad elejétől egészen a robbantások megkezdéséig fokozatosan csökkent (Suess, 1955), azaz a légkörben is egyre csökkenő arányban lehetett jelen a radiokarbont tartalmazó szén-dioxid. Természetes körülmények között a radiokarbon a kozmikus sugárzás hatására, a naptevékenység ingadozásától eltekintve, állandó ütemben keletkezik a légkörben. Ezzel egyidejűleg 5730 éves felezési idővel bétabomlás révén állandó ütemben bomlik. A két folyamat együtt közelítőleg állandó – egyensúlyi – koncentrációt eredményez. A radiokarbon csökkenő részaránya a légköri szén-dioxid „hígulását”, azaz radiokarbont nem tartalmazó szén-dioxid felhalmozódását jelenti. Radiokarbon-mentes szén a légkörrel régóta anyagcserét nem folytató széntárolókból kerülhet a levegőbe, melyekben a radiokarbon már elbomlott. Ilyen széntároló a litoszféra, ahonnan radiokarbon-mentes szén a vulkáni tevékenység (vulkánkitörések, szivárgások és hasonló) révén, illetve a kibányászott fosszilis tüzelőanyagok elégetése révén juthat a légkörbe. Az eleve kis hozamú vulkáni tevékenységben számottevő változás nem történt, a fosszilis tüzelőanyagok egyre növekvő felhasználása azonban már a 19. századtól a statisztikai adatokból jól nyomon követhető volt. Ebből következően jutott el Roger Revelle (1909–1991) és Hans Suess (1909–1993), a Scripps Oceanográfiai Intézet (San Diego, Ca-

lifornia, USA) igazgatója és munkatársa arra, hogy az emberi tevékenységből származó szén-dioxid a légkörben valószínűleg felhalmozódik, és ennek messze ható éghajlati következményei lehetnek (Revelle–Suess, 1957). Ez a gyanú vezetett el aztán ahhoz, hogy 1957-ben a Nemzetközi Geofizikai Év keretében megindultak a folyamatos, nagy pontosságú légköri szén-dioxid-koncentráció mérések, amelyek néhány éven belül igazolták ennek az üvegházhatású anyagnak a légköri felhalmozódását.

NAPJAINK ÉGHAJLATKUTATÁSA

Immáron több mint egy évszázada tudjuk, hogy a légkör néhány alkotója meghatározó szerepet játszik bolygónk éghajlatának alakításában. Ahogy már Tyndall felismerte: mennyiségük bármilyen megváltozásának a természeti törvényeknek megfelelően éghajlatváltozást kell okoznia. Az üvegházhatású gázok régóta tartó felhalmozódása mérésekkel jól dokumentált, tehát az éghajlatváltozásnak is folyamatban kell lennie. A jégfelületek zsugorodása, a vegetációs övek eltolódása, a tengerszint emelkedése jelzi is ezt a folyamatot. A légkörtudomány a hőmérsékletváltozás észlelésével nem felfedezte az éghajlatváltozást, hanem regisztrálta a törvényszerűen kialakuló változásokat. Éppen ezért logikátlan feltételezni, hogy esetleg hibás, nem reprezentatív hőmérsékletmérések miatt „hisszük” azt, hogy változik bolygónk éghajlata. Ezt egyébként a fent említett „hibamentes” természetes hőmérők is cáfolják.

A napjainkban tapasztalt éghajlati változások az éghajlati modellek megbízhatósági határain belül összhangban vannak az üvegházhatás erősödésével. Mindez természetesen nem zárja ki, hogy ne lehetnének egyéb ható tényezők is, de a potenciálisan leginkább érintett tudományterületek, a csillagászat és a geofizika eddig nem bukkant olyan természeti folyamatra, melynek hatása összemérhető lenne az üvegházhatás erősödésével, és ugyanígy, tendenciaszerű változást okozhatna. A Nap energiakibocsátásában megfigyelt enyhe növekedés jelentéktelen az üvegházhatású gázok mennyiségének növekedése által keltett energetikai kényszerhez képest (Myhre et al., 2013). Napjaink éghajlatkutatása előtt tehát nem annyira az a kérdés áll, hogy mi okozza a tapasztalt éghajlatváltozást, hiszen régóta ismerjük a meghatározó okot, hanem az, hogy milyen mértékű és ütemű változással kell szembenéznünk.

IRODALOM

- Ångström, K. (1900): Ueber die Bedeutung des Wasserdampfes und der Kohlensäure bei der Absorption der Erdatmosphäre. *Annalen der Physik*, 308, 720–732. DOI: 10.1002/andp.19003081208
- Arrhenius, S. (1896): On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. *Philosophical Magazine and Journal of Science Series*, 5, 41, 237–276. DOI: 10.1080/14786449608620846, https://www.rsc.org/images/Arrhenius1896_tcm18-173546.pdf
- Arrhenius, S. (1908): *Worlds in the Making*. New York–London: Harper and Brothers Publishers, <https://archive.org/details/worldsinmakingev00arrhrich>
- Bard, E. (2004): Greenhouse Effect and Ice Ages: Historical Perspective. *Comptes Rendus Geoscience*, 336, 603–638. DOI: 10.1016/j.crte.2004.02.005
- Callendar, G. S. (1938): The Artificial Production of Carbon Dioxide and Its Influence on Temperature. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 64, 223–240. DOI: 10.1002/qj.49706427503, <https://www.rmets.org/sites/default/files/qjcallender38.pdf>
- Ekhholm, N. (1901): On the Variations of the Climate of the Geological and Historical Past and Their Causes. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 27, 1–62. DOI: 10.1002/qj.49702711702
- Fleming, J. R. (2007): *The Callendar Effect*. Boston: American Meteorological Society, https://www.colby.edu/sts/callendar_effect_ebook.pdf
- Foote, E. (1856): Circumstances Affecting the Heat of the Sun's Rays. *The American Journal of Science and Arts*, 32, 382–383. <https://bit.ly/3ooTynB>
- Hansen, J. – Sato, M. – Kharecha, P. et al. (2008): Target Atmospheric CO₂: Where Should Humanity Aim? *The Open Atmospheric Science Journal*, 2, 217–231. DOI: 10.2174/1874282300802010217, <https://bit.ly/3c4O37M>
- Hulburt, E. O. (1931): The Temperature of the Lower Atmosphere of the Earth. *Physical Review*, 38, 1876–1890. DOI: 10.1103/PhysRev.38.1876
- Hunt, T. S. (1863): On the Earth's Climate in Paleozoic Times. *The American Journal of Science and Arts*, 36, 396–398. <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=hvd.32044102904273>
- Jackson, R. (2019): Eunice Foote, John Tyndall and a Question of Priority. Notes and Records. *The Royal Society Journal of the History of Science*, 74, 105–118. DOI: 10.1098/rsnr.2018.0066, <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rsnr.2018.0066>
- Myhre, G. – Shindell, D. – Bréon, F.-M. et al. (2013): Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Stocker, T. F. – Qin, D. – Plattner, G.-K. et al. (eds.): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom–New York, NY, USA: Cambridge University Press, 659–740. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf
- Revelle, R. – Suess, H. E. (1957): Carbon Dioxide Exchange between Atmosphere and Ocean and the Question of an Increase of Atmospheric CO₂ during the Past Decades. *Tellus*, 9, 18–27. DOI: 10.1111/j.2153-3490.1957.tb01849.x, <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.3402/tellusa.v9i1.9075>
- Suess, H. E. (1955): Radiocarbon Concentration in Modern Wood. *Science*, 122, 415–417. DOI: 10.1126/science.122.3166.415-a
- Szarka L. – Soon, W. W. H. – Cionco, R. G. (2021): How the Astronomical Aspects of Climate Science Were Settled? On the Milankovitch and Bacsák Anniversaries, with Lessons for Today. *Advances in Space Research*, 67, 700–707. DOI: 10.1016/j.asr.2020.09.020, <http://real.mtak.hu/124524/1/2021-Szarka-et-al-1-s2.0-S0273117720306499-main.pdf>

Tyndall, J. (1861): The Bakerian Lecture: On the Asorption and Radiation of Heat by Gases and Vapours, and on the Physical Connexion of Radiation, Absorption, and Conduction. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 151, 1–36. DOI: 10.1098/rstl.1861.0001, <http://web.gps.caltech.edu/~vijay/Papers/Spectroscopy/tyndall-1861.pdf>

Tyndall, J. (1863): On Radiation through the Earth's Atmosphere. *Philosophical Magazine Series*, 4, 25, 200–206. DOI: 10.1080/14786446308643443

URL1: https://archive.org/details/bub_gb_TDQJAAAAIAAJ

URL2: <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k65708960/f142.item>

URL3: https://www.academie-sciences.fr/pdf/dossiers/Fourier/Fourier_pdf/Mem1827_p569_604.pdf

URL4: <https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k95017r>