



A légkör szerepe az éghajlati rendszerben

Haszpra László

HUN-REN Atommagkutató Intézet, HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, haszpra.l@gmail.com

DOI: 10.56474/legkor.2025.3.1

A Föld jelenkori gyors éghajlatváltozásában meghatározó szerepet játszik a légkör, ezen belül az üvegházhatású gázok mennyiségének változása. A tanulmány részletesen bemutatja a légköri üvegházhatás működését és az éghajlati rendszer legfontosabb kapcsolódó visszacsatolási folyamatait. Ismeretterjesztő szándékkal kitér néhány gyakran felbukkanó tévhitre, bemutatva a valóságban zajló folyamatokat.

The role of the atmosphere in the climate system

Changes in the atmosphere, including the amount of greenhouse gases, play a crucial role in the Earth's current rapid climate change. This paper describes in detail the functioning of the atmospheric greenhouse effect and the main associated feedback processes in the climate system. With the intention of informing the reader, it addresses some of the common misconceptions, by illustrating the processes that actually take place.

A Föld éghajlatát a Nap energiakibocsátása, a Nap-Föld távolság, a légkör átbocsátó képessége, a felszíni energiaelnyelés, a légköri és óceáni áramlások energiaszállító képessége, valamint a bolygó belső hője együttesen határozza meg. A Föld forgástengelye nem merőleges az ekliptika síkjára, a különböző energiaelnyelő tulajdonságú (albedójú) területek pedig nem egyenletesen helyezkednek el a bolygó felületén. Ezért nem mindegy, hogy a Nap körüli elliptikus pálya adott szakaszán a bolygónak éppen mely felületrészét éri leginkább a napsugárzás. A keringési pálya excentricitása, a bolygó forgástengelyének dőlésszöge és iránya folyamatosan változik az égi mechanika törvényszerűségeinek megfelelően, ami az éghajlat ciklikus változását vonja maga után (lásd Milanković ciklusok - *Kostadinov and Gilb*, 2014). Az óceánok vízfelülete általánosságban nagyobb

részt nyel el a beérkező energiából, kevesebbet ver vissza (kisebb az albedója), mint a kontinentális területek. A tektonikus folyamatok következtében változik a kontinensek elhelyezkedése és a bolygó domborzata, ami egyrészt kihat a globális energiamérlegre, továbbá a légköri és az óceáni energiaszállításra, végső soron magára az éghajlatra. Az éghajlat alakulásában szerepet játszik a jég- és hóborítottság alakulása, a sivatagos és növényzettel borított területek elhelyezkedése és a felhőzet is. Természetes körülmények között ezek azonban magától az éghajlattól függenek, önmagukban nem tudnak éghajlatváltozást elindítani. Passzív éghajlatalakító tényezők, melyek visszacsatolásként lépnek be az éghajlat alakításába. Kiterjedt földhasználat-változtatással (erdőirtások/-telepítések) az ember ezeken a tényezőkön keresztül is elindíthat éghajlatváltozást.

A Föld pályaelemei csak sokezer éves időskálán változnak érdemben, míg a kontinensek jelentősebb elmozdulása, a domborzat módosulása évmilliókat vesz igénybe. A Naptól érkező energiafluxus (energiaáram) mellett egyébként is elhanyagolható, mindössze annak ~0,025%-át kitevő földi hőfluxus (Davies and Davies, 2010; Prša et al., 2016) ugyancsak nem változik egyik napról a másikra. A napjainkban tapasztalható, geológiai időskálán nézve rendkívül gyors éghajlatváltozás okát tehát elsősorban a naptevékenységben és/vagy a légköri energiaátvitelben kell keresnünk.

A Nap

A Nap energiakibocsátásában, az egyenletes átlagos kibocsátásra rakódva többé-kevésbé ciklikus ingadozások figyelhetők meg. Ezek közül legismertebb a körülbelül 11-éves periódusidejű napfoltciklusokhoz kötődő energiafluxus-ingadozás. Ennek során mintegy 0,1%-ot változik (Chatzistergos et al., 2023) a közepes Nap-Föld távolság mellett a légkör külső határán névlegesen 1361 W m^{-2} -es (Prša et al., 2016) besugárzás (Total Solar Irradiance [TSI]). Bár ennek az ingadozásnak van kimutatható légköri hatása (Zhou and Tung, 2013; Kuchar et al., 2015; Amdur et al., 2021), az óceánok hatalmas hőtehetetlensége miatt ez a rövid ciklusidejű folyamat nem gyakorol érdemi hatást a globális éghajlatra.

Hosszabb távon a naptevékenység ~11-éves ciklusának amplitúdója nem teljesen állandó. Közismert a középkori kis jégkorszakkal kapcsolatba hozható Maunder-minimum (1645—1715) vagy a kevésbé hangsúlyos Dalton-minimum (1790—1820), míg a 20. század második felét az átlagosnál erőteljesebb naptevékenység jellemezte (Usoskin, 2023). Az ezredforduló tájától kisebb csökkenés következett be (Chatzistergos et al., 2023), de az eddigi adatok alapján (Solar Influences Data Analysis Center, 2025) egyelőre nem dönthető el, hogy a Nap elindult-e egy újabb nyugodtabb, alacsonyabb energiakibocsátású időszak felé vagy sem. A különböző rekonstrukciók szerint a Maunder-minimumtól a 2010-es évek végéig legfeljebb $2,2 \pm 0,7 \text{ W m}^{-2}$ -rel, azaz mintegy 0,15%-kal erősödhetett a légkör külső határát elérő energiafluxus (Chatzistergos et al., 2023), ami alig haladja meg a 11-éves napciklusokon belüli ingadozás mértékét. Mivel azonban ez trendszerű változás volt, már valamelyest nyomott hagyott a bolygó éghajlatán, kiemelte a bolygót a Maunder minimumot jellemző ún. kis jégkorszakból.

Összességében a Nap által kibocsátott energiafluxus időbeli változása, ingadozása olyan csekély, hogy rövid időtávon nincs jelentős szerepe a Föld éghajlatának alakításában (Amdur et al., 2021; Drótos et al., 2024). Alátámasztja ezt az is, hogy az utóbbi néhány évtized enyhén csökkenő energiafluxusa mellett a globális átlaghőmérséklet gyorsuló ütemben emelkedett (Lindsey, 2021). A jelenlegi gyors éghajlatváltozás okát tehát elsősorban a légkörben kell keresnünk.

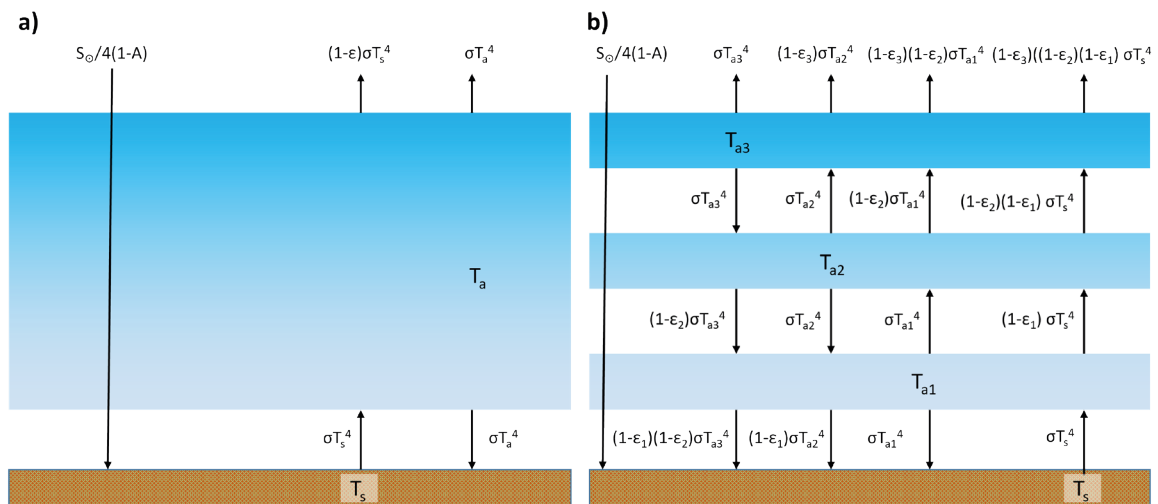
Az üvegházhatás

A Naptól a Föld sugárzásra merőleges felületére ($R^2\pi$, ahol R a Föld sugara) érkező 1361 W m^{-2} -es energiafluxus a Föld teljes felületét ($4 R^2\pi$) tekintve átlagosan $1361/4 \approx 340 \text{ W m}^{-2}$ bevételt jelent négyzetméterenként a légkör külső határán. A jelenlegi légköri és felszíni viszonyok mellett a bolygó albedója, a világűr felé visszavert sugárzás aránya körülbelül 29,5%, azaz a beérkező sugárzásból 100 W m^{-2} nem hasznosul az éghajlati rendszerben (Wild et al., 2015). Egyensúlyi esetben az elnyelt 240 W m^{-2} energiafluxussal egyenlő kisugárzásnak kell fellépnie a légkör külső határán. A Stefan-Boltzmann törvény szerint egy test, közeg hőmérsékleti sugárzása arányos a hőmérséklet negyedik hatványával:

$$S_{\odot}/4 (1-A) = \sigma T^4, \quad (1)$$

ahol $S_{\odot}$ a Naptól érkező energiaáram (1361 W m^{-2}), A a Föld, a felszín és a légkör együttes albedója (jelenleg 0,295), σ a Stefan-Boltzmann állandó ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$), T pedig a hőmérséklet. Az egyenlet bal oldala a beérkező, éghajlati szempontból hasznosuló, míg a jobb oldala a kisugárzott energiaáramot adja. Behelyettesítve az ismert adatokat a hőmérsékletre 255 K -t, azaz $18 \text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot kapunk. Ez a Föld effektív hőmérséklete (T_e), mely csak a Naptól a légkör külső határára érkező energiafluxustól és az albedótól függ. A Föld felszíni átlaghőmérséklete azonban ennél lényegesen magasabb, jelenleg kb. $+15 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

A bolygót elhagyó sugárzás a felszín és a légkör hőmérsékleti kisugárzásából tevődik össze. A légkörben azonban számos olyan nyomgáz található (vízgőz, szén-dioxid, metán, dinitrogén-oxid, ózon, halogéntartalmú vegyületek stb.), melyek a felszín hőmérsékleti kisugárzásának hullámhossz-tartományában elnyelnek, az általuk elnyelt energia pedig a légkört fűti. Míg a felszín csak felfelé tud hőmérsékleti sugárzást kibocsátani, a légkör minden irányban. Eredőben az energiafluxus fele a felszín felé irányul, kiegészítő energiát nyújtva a Naptól érkező energia mellé.



1. ábra. Egyszerű 1-rétegű (a), illetve többrétegű (b) légköri sugárzási modell. T_s és T_a (T_{a1} , T_{a2} , T_{a3}) a felszín, illetve a légkör hőmérséklete, S_0 a légkör külső határára érkező energiaáram, A az albedó, ϵ (ϵ_1 , ϵ_2 , ϵ_3) a légköri elnyelés aránya, σ a Stefan-Boltzmann állandó.

Az 1. ábra bal oldala egy egyszerű egyrétegű légkör-moddellel szemlélteti a jelenséget. Feltételezve egy a beérkező sugárzás számára teljesen átlátszó légkört, a beérkező és a kilépő, egymással egyenlő energiafluxus a légkör felső határán (2), illetve a felszínen (3) az 1. ábrán használt jelölésekkel:

$$\sigma T_a^4 + (1-\epsilon) \sigma T_s^4 = S_0/4 (1-A) \quad (2)$$

$$\sigma T_s^4 = S_0/4 (1-A) + \sigma T_a^4 \quad (3)$$

A (2) egyenletből a felszínt elérő besugárzást behelyettesítve a (3) egyenletbe, majd az így kapott egyenletet átrendezve és $\epsilon > 0$ feltételezésével kifejezve a felszíni hőmérsékletet:

$$\sigma T_s^4 = \sigma T_a^4 + (1-\epsilon) \sigma T_s^4 + \sigma T_a^4 \quad (4)$$

$$T_s = T_a (2/\epsilon)^{1/4} \quad (5)$$

Az (1) egyenletet figyelembe véve a légkör külső határára vonatkozó (2) egyenlet átírható az alábbi formába:

$$S_0/4 (1-A) = \sigma T_e^4 = \sigma T_a^4 + (1-\epsilon) \sigma T_s^4 \quad (6)$$

Az (5) egyenletből T_a -t, illetve T_s -t kifejezve és felhasználva:

$$T_a = (\epsilon / (2 - \epsilon))^{1/4} T_e \quad (7)$$

$$T_s = (2 / (2 - \epsilon))^{1/4} T_e \quad (8)$$

Mivel $0 < \epsilon \leq 1$, $T_a \leq T_e < T_s$. Kiindulva az (1) egyenletben a Földre kapott 255 K fokos effektív hőmérsékletből, ezzel az egyszerű egyensúlyi modellel azt kapjuk, hogy a jelenlegi albedó mellett teljesen átlátszó légkör esetén a felszíni hőmérséklet -18°C , míg teljesen elnyelő esetében $+30^\circ\text{C}$ lenne, szemben a tényleges $+15^\circ\text{C}$ körüli hőmérséklettel. Amennyiben tehát a légkörben a felszín és a légkör hőmérsékleti kisugárzását elnyelni képes anyagok vannak, akkor a felszín a bolygóra jellemző, csak a napsugárzástól és az albedótól függő effektív hőmérsékletnél melegebb lesz a légköri visszasugárzás miatt. Azokat a nyomanyagokat, melyek a légkörben ezt a jelenséget előidézik, üvegházhatású gázoknak hívjuk.

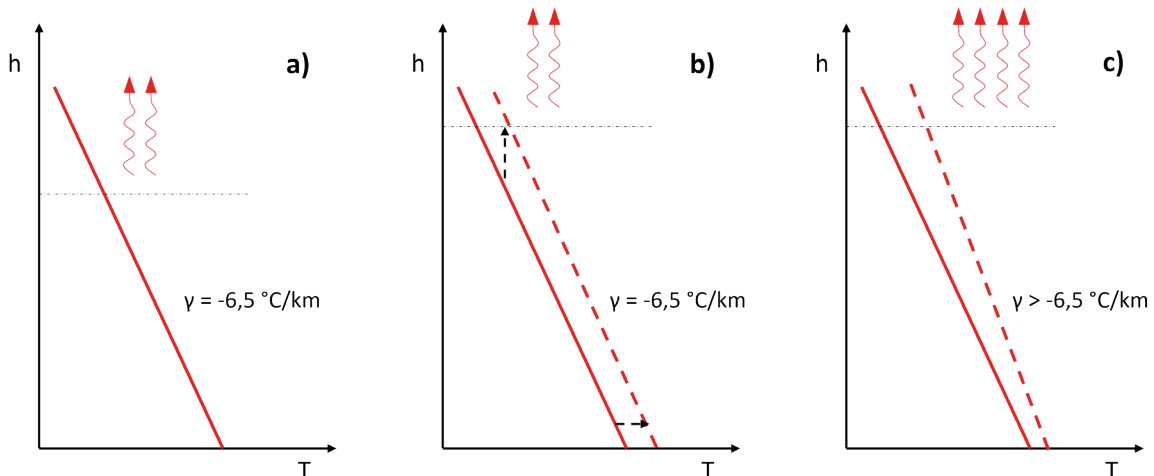
Többrétegű sugárzási-egyensúlyi modellt is létrehozhatunk (1.b ábra), melyben minden légrétegre külön-külön írjuk fel a fentiekhez hasonló energia-egyensúlyi egyenletet. A T -ben lineáris egyenletrendszer viszonylag könnyen megoldható, és az egyes légrétegek hőmérsékletére kapott adatokból ($T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$) függőleges hőmérsékleti profil is előállítható. A nem-kondenzálódó üvegházhatású gázok (a vízgőz kivételével az összes többi üvegházhatású gáz) hosszú légköri tartózkodási idejük miatt jól elkeverednek a légkörben, térfogat-arányuk a troposzférában és a sztratoszféra alsó részében a magassággal alig változik. A levegő sűrűsége viszont a magassággal exponenciálisan csökken. Ennek következtében az egységnyi térfogatban lévő molekulák száma, azaz az abszolút koncentráció, azonos térfogat-arány mellett is alacsonyabb, mint az alsóbb légrétegekben, ezért a magasabban fekvő légrétegek elnyelése kisebb.

A felszínről és a felszínközeli légrétegekből származó hőmérsékleti sugárzás fotonjai az üvegházhatású gázok magas abszolút koncentrációja miatt csak nagyon kis arányban jutnak el a felsőbb rétegekbe, illetve a világűrbe. A bolygó energetikai egyensúlyához szükséges energiakisugárzás zöme a magasabb légrétegekből származik. Ha üvegházhatású gázokat adunk a légkörhöz, akkor a növekvő elnyelés miatt a fotonok csak magasabb légrétegekből tudnak nagyobb arányban távozni. Mivel ezek a rétegek egyben hidegebbek is, ezért az innen távozó energia az $E = \sigma T^4$ összefüggés miatt alacsonyabb, mint a korábbi, alacsonyabb üvegházgáz tartalom mellett volt. A változatlan energiabevétel mellett csökkenő energiakibocsátásból fakadó energetikai differencia – jelenleg $\sim 0,8 \text{ W m}^{-2}$ (von Schuckmann et al., 2023) – mindaddig melegíti a bolygót, a légkört, amíg a magasabb légrétegek hőmérséklete is el nem éri azt a szintet, amelyenél a kibocsátott energia már megegyezik a beérkezővel.

Hasonló a helyzet ahhoz, mint amikor egy épületre egy újabb réteg hőszigetelést helyezünk fel. A szemléletesség kedvéért tekintsük a felszínközeli légréteget az épület belső terének, melyet állandó teljesítménnyel fűtünk. A belső fűtés a Naptól érkező állandó energiaáramot szimbolizálja. Egyensúlyi hőmérséklet mellett a falakon annyi energia távozik, amennyit bent a fűtésre használunk. Ha újabb réteg hőszigetelést

helyezünk a falra, akkor a fal külső hőmérséklete alacsonyabb lesz, mint korábban volt, és így kevesebb hőt tud leadni. Odabent viszont az el nem távozott hő emeli a hőmérsékletet mindaddig, amíg a megemelkedett belső hőmérséklet következtében a többlétszigetelés ellenére is ugyanannyi hő tud távozni, mint amennyi bent keletkezik. Az itt csupán minőségileg leírt jelenség egyben azt a megfigyelést is megmagyarázza, hogy a növekvő üvegházgáz koncentrációk okozta erősödő üvegházhatás (a pótlólagos „szigetelés a falon”) mellett a légkör magasabb rétegeinek a hőmérséklete miért csökken (Goessling and Bathiany, 2016).

Az üvegházhatás erősödése miatt az adott hőmérsékletű légréteget magasabban találjuk meg, mint korábban. Ha az alsóbb légrétegek nem melegednének arányosan, akkor csökkenne a légkör függőleges hőmérsékleti gradiense. A légkör az energiát alapvetően a rövidhullámú sugárzást elnyelő, felmelegedő felszíntől kapja részint sugárzással, részint a felmelegedés hatására meginduló függőleges anyagárammal (konvekció, szenzibilis hőáram). A felmelegedő, és az adott nyomás mellett ezért a környezeténél alacsonyabb sűrűségűvé váló légtömegre felhajtóerő hat. Emelkedése addig tart, míg adiabatikus hűlése mellett környezetével azonos sűrűségűvé nem válik. A felszíni párolgás (latens hőáram), majd az emelkedő, hűlő levegőből kikondenzálódó vízgőz a fázisátalakulások miatt



2. ábra. A troposzféra függőleges hőmérsékleti gradiense (standard légkör: $\gamma = -6,5 \text{ }^{\circ}\text{C km}^{-1}$) változása a kiindulási helyzethez (a) képest az üvegházgáz-mennyiség növekedésével és a konvekciós folyamatok által kialakított hőmérsékleti profil. A vízszintes pontozott fekete vonal azt a szintet jelzi, melyről a világűrbe kisugárzott energia jellemzően származik. Az ez alatti légrétegekből a légköri elnyelés, az e fölötti légrétegekből pedig az alacsonyabb hőmérséklet miatt kevesebb energia távozik a bolygóról. Az üvegházgáz-mennyiség növekedésével nem csak a koncentráció nő, hanem magasabbra kerül az a réteg is, melyből már távozni tud az energia (b). A (c) ábra azt az elsősorban a trópusi területeket jellemző helyzetet mutatja, amelyben a megnövekedett vízgőztartalom miatt a függőleges hőmérsékleti profil a nedves adiabatikus profil felé közelít ($\gamma > -6,5 \text{ }^{\circ}\text{C km}^{-1}$), és kialakul a negatív „lapse rate” visszacsatolás, mely az intenzívebb kisugárzás miatt a felszínen és a légkör alsó részében mérsékli a felmelegedést.

ugyancsak energiát von el a felszíntől és ad le a magasabb légrétegekben. Ha lecsökken, kevésbé negatívvá válik a függőleges hőmérsékleti gradiens, az a csökkenő felhajtóerő miatt akadálya a felszínközeli légréteg illetően konvektív energiavesztésének, ami a felszínközeli légrétegben fokozza a felmelegedést (2.a-b ábra).

Abból a tényből kiindulva, hogy a felszínről, a felszínközeli légrétegekből származó hőmérsékleti sugárzás az alacsonyabban fekvő légrétegek erőteljes elnyelése miatt alig jut ki a légkörből, és ezen további üvegházgáz-mennyiség hozzáadása már nem sokat módosít, arra a következtetésre juthatunk, hogy az üvegházhatású gázok további kibocsátása érdemi éghajlatváltozást már nem okozhat. Az Ångström által az előző századfordulón a szén-dioxiddal kapcsolatban helyesen elvégzett, de hibásan értelmezett mérésein (Ångström, 1900) alapuló elképzelést, az előző bekezdésekben vázolt módon már a kortársak is cáfolták. Ennek ellenére a légkör szén-dioxiddal való „telítettségének” elmélete a klímaváltozás tudomány által feltárt okaival szemben szkeptikusok körében mindmáig gyakran felbukkan. Az üvegházhatás fentiekben vázolt működéséből látszik, hogy még ha a légkör alsó rétegeinek egésze teljesen átlátszatlan is lenne a szén-dioxid sugárzáselnyelése következtében, további szén-dioxid hozzáadása mégis emelné a felszínközeli „telített” légréteg hőmérsékletét, melegebbé tenné az éghajlatot.

Az 1. ábrán bemutatotthoz hasonló és fentebb leírt egyszerű sugárzási egyensúlyi modellt már Arrhenius is használt a légköri üvegházhatás mértékének becslésére (Arrhenius, 1896), míg a sugárzási és konvektív folyamatokat egyaránt figyelembe vevő modell megalkotásáért (Manabe and Strickler, 1964; Manabe and Wetherald, 1967) Syukoro Manabe 2021-ben megosztott fizikai Nobel-díjat kapott. Manabe egydimenziós sugárzási-konvektív egyensúlyi modellje helyett, a megnövekedett számítási kapacitásnak és bővülő ismereteinknek köszönhetően ma már nagyfelbontású háromdimenziós modellek is rendelkezésre állnak, melyek jobban tudják kezelni a felhő- és csapadékképződést, az üvegházhatású gázok és az aeroszol-részecskék térbeli eloszlását és egyéb folyamatokat (Jeevanjee et al., 2022).

Visszacsatolások

Az üvegházhatású gázok mennyiségének változása az üvegházhatás erősségének a megváltozásához vezet, amely közvetlenül a felszín-légkör rendszer hőmérsékleteloszlásának megváltozásában jelentkezik. A hőmérséklet azonban a párolgás intenzitásától

a vegetációs övek elhelyezkedésén, a jégborítottság kiterjedésén, a kémiai reakciók sebességén keresztül számtalan folyamatot befolyásol a bolygón, melyek jelentős része közvetlenül vagy közvetve visszahat a légkörre, az éghajlatra. Ezeket a folyamatokat nevezzük visszacsatolásoknak, melyek ráerősíthetnek az üvegházhatású gázok mennyiségének változásából fakadó éghajlatváltozásra (pozitív visszacsatolások) vagy fékezhetik azt (negatív visszacsatolások).

Tételezzük fel, hogy a légkörbe annyi üvegházhatású gáz jut (emberi tevékenység, vulkáni aktivitás stb.), mely a felszíni hőmérsékletet $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ -kal megemeli. Pusztán a jelenség illusztrálására, az egyszerű számítás kedvéért tegyük fel, hogy mindez más természeti folyamatok beindításával további $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os felmelegedést okoz, azaz 50%-kal erősíti az eredeti kiváltó (trigger) hatást. Természetesen, ez a fél fokos hőmérsékletemelkedés sem marad válasz nélkül. Az erre a többletmelegedésre adott 50%-os „reakció” további $0,25\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot eredményez, és így tovább. Végül a példánkban $1 + 0,5 + 0,25 + 0,125 + \dots = 2$, azaz a közvetlen hatás-hoz képest kétszeres hőmérsékletemelkedéssel szembesülünk. Hasonlóan számolhatunk a negatív visszacsatolásokkal is, melyeknél a trigger olyan folyamatot vált ki, mely ellene hat a változásnak. Hasonló, 50%-os visszacsatolás esetén $1 - 0,5 + 0,25 - 0,125 + \dots = 0,67$ lenne a ténylegesen bekövetkező hőmérsékletváltozás. A valóságban a visszacsatolások nem feltétlenül lineárisak, és minden folyamatnak más és más az erősítési tényezője. Megkülönböztetünk gyors (pl. párolgás), lényegében azonnal működésbe lépő és ható visszacsatolásokat és lassú visszacsatolásokat (pl. albedó-változás), melyek évszázadokra-évezredekre elhúzzák a megváltozott körülményekhez illeszkedő új egyensúlyi helyzet elérését.

Az éghajlati rendszerben az egyik legerősebb – pozitív – visszacsatolást a vízgőz adja, lévén maga is üvegházhatású, erőteljes elnyeléssel a bolygó hőmérsékleti kisugárzásának tartományában. A Földön elegendő mennyiségű hozzáférhető cseppfolyós víz van ahhoz, hogy globális szinten korlátozás nélkül párologhasson vízgőz a levegőbe. A légkör vízgőztartalmát a kondenzációs folyamatok szabályozzák, melyek adott mennyiségű, fizikai és kémiai tulajdonságú kondenzációs mag mellett alapvetően a relatív nedvességtől függenek. A vízgőz globális átlagos légköri tartózkodási ideje 8-10 nap (Gimeno et al., 2021), ezért a vízgőztartalom környezeti változásokhoz való alkalmazkodása gyors.

Ha feltételezzük, hogy a légkörben sem a kondenzációs-mag-tartalom, sem a kondenzációs magok fizikai és kémiai tulajdonságai nem változnak, akkor a kon-

denzációhoz szükséges átlagos relatív nedvességtartalom sem változik, akár melegszik, akár hűl a légkör. Az adott relatív nedvességtartalomhoz tartozó abszolút vízgőz-koncentráció azonban, ami a hőmérsékleti sugárzás elnyelését meghatározza, exponenciálisan függ a hőmérséklettől (Clausius-Clapeyron összefüggés): fokenként mintegy 7%-kal változik a légkör adott relatív nedvességhez tartozó vízgőztartalma. Bár a vízgőz légkörbe való bepárolgását és kondenzációját számtalan folyamat befolyásolja, térbeli eloszlása rendkívül heterogén, átlagosan azonban a mérések szerint a légkör relatív nedvességtartalma közelítőleg állandó, az abszolút nedvesség – cirkulációs okok miatt jelentős területi eltérésekkel – közelítőleg követi a hőmérsékleti változásokat (Allan et al., 2022; Cséplő et al., 2022; Wan et al., 2024). A vízgőz-visszacsatolás önmagában körülbelül kétszeresére erősíti a gerjesztő hatást (Previdi et al., 2013; Liu et al., 2018).

Egy másik jelentős éghajlati visszacsatolás a Föld albedójának a trigger hőmérsékletváltozás hatására történő megváltozása. Ez több részből tevődik össze, és csak részben érinti közvetlenül a légkört. Míg a felszíni változások elsősorban a beérkező rövidhullámú sugárzás hasznosulását (elnyelését) érintik, a légköri változások mind a bejövő rövidhullámú, mind a kimenő hosszuhullámú sugárzásátvitelt befolyásolják.

A felszín-légkör rendszer hőmérsékleteloszlásának változása befolyásolja a felhőzet kiterjedtségét és struktúráját, ami kihat a Föld albedójára. A tapasztalatok arra utalnak, hogy ez a visszacsatolás is pozitív, erősítő jellegű. Elsősorban az alacsony szintű felhőzet csökkenése figyelhető meg, ami csökkenti az albedót, így nő a rövidhullámú energiabevétel, ami pedig erősíti a felmelegedést (Goessling et al., 2025). Az albedó lassú csökkenése már a 2000-es évektől kimutatható (Li et al., 2024), de ebben a felhőzet változása mellett benne van az emberi eredetű, a rövidhullámú sugárzást visszaverő aeroszol részecskék kibocsátásának csökkenése és ennek felhőképződésre gyakorolt hatása, valamint a felszínborítottság változása is.

Bár a felszínborítottság változása nem érinti közvetlenül a légkört, az éghajlati rendszerben játszott jelentős és sajátos szerepe miatt mindenképpen említést érdemel. A légkör üvegházhatásának megváltozása által kiváltott felszíni hőmérsékletváltozás megváltoztatja a jéggel borított, a rövidhullámú sugárzás visszaverésében kulcsszerepet játszó területek (sarkvidéki jégmezők, magashegyi gleccserek) kiterjedését, ezen keresztül a Föld albedóját. Az emelkedő hőmérséklet a jégmezők zsugorodását, a felszíni energiabevétel növekedését, azaz a hőmérséklet fokozott növekedé-

sét idézi elő. Csökkenő hőmérséklet esetén a jégmezők kiterjedésének növekedése ráerősít a lehülésre. Elsősorban ennek az erőteljes pozitív visszacsatolásnak, továbbá a már említett vízgőz-visszacsatolásnak köszönhetjük a pleisztocén időszak drasztikus éghajlati kilengéseit (jégkorszakok), melyeket a Milankovič ciklusok viszonylag csekély besugárzás-ingadozásai önmagukban nem tudtak volna előidézni. Ezzel kapcsolatban megjegyzendő, hogy az éghajlatnak a kényszerekre való érzékenysége erősen éghajlatfüggő. A jégkorszakok időszakával szemben, a földtörténet melegebb időszakaiban, amikor a bolygó lényegében jégmentes volt, a jégalbedó visszacsatolás nem működhetett. Ugyanakkor e magasabb hőmérséklet mellett a vízgőz-visszacsatolás erősebb lehetett, mint manapság (Bloch-Johnson et al., 2021).

Az úszó tengeri jég viszonylag kis tömege miatt gyorsan reagál a hőmérséklet megváltozására, a több nagyságrenddel nagyobb szárazföldi jégtömeg elolvadása azonban nagy hőkapacitása miatt hosszan tartó folyamat. A jégfelületek kiterjedése mellett a Föld albedóját a vegetációs övek, sivatagi területek elhelyezkedése, kiterjedése is befolyásolja, ami szintén csak lassan változhat. Ezeknek a lassú visszacsatolásoknak, illetve az óceánok lassú átkeveredésének, átmelegedésének köszönhető, hogy az éghajlat csak sok száz, több ezer év alatt érné el az adott légköri üvegházgáz-tartalomhoz tartozó új egyensúlyi állapotát.

Részben a melegedés miatt növekvő vízgőztartalom miatt, részben pedig azért, mert a magasban, az alacsonyabb abszolút koncentráció mellett viszonylagosan hatékonyabb a hőmérsékleti sugárzás elnyelése, elsősorban a trópusokon a függőleges hőmérsékleti gradiens valamelyest nő, kevésbé negatívvá válik (2.c ábra), közelebb esik a nedves adiabatikus hőmérsékleti gradienshez. Így magasabb lesz azon rétegek hőmérséklete, melyekből az energia zöme már a világűrbe távozhat. A magasabb hőmérséklet nagyobb energiakibocsátással jár, azaz a jelenség negatív visszacsatolásként mérsékli a bolygó felmelegedést. Az elfogadott magyar elnevezés híján „lapse rate” (a függőleges hőmérsékleti gradiens változásával létrejövő) visszacsatolásnak nevezett jelenség közel harmadával mérsékli vízgőztartalom növekedéséből fakadó erőteljes pozitív visszacsatolás hatását. A hőmérsékleti profil változásának tovaryűző hatása van a felhő- és csapadékképződésre és a cirkulációs viszonyokra, melyek szintén szerepet játszanak az éghajlat alakításában.

A felsorolt fizikai visszacsatolásokon kívül nem elhanyagolható, de egyelőre alig számszerűsített hatása van a többnyire pozitív biogeokémiai visszacsatolásoknak is.

A melegedés nemcsak a vízgőz, hanem más üvegházhatású gázok természetes kibocsátására, illetve légkörből való kikerülésére is hatással van, azaz visszahat magára a melegedést kiváltó üvegházhatásra.

A trópusi területek egy részének melegebbé és nedvesebbé válása növeli a metán, a második legfontosabb nemkondenzálódó üvegházhatású gáz kibocsátását, ahogy erről nemrég a Légkör hasábjain is szó esett (Haszpra, 2022). A sarkvidéki területek melegedésével, a permafroszt olvadásával szén-dioxid és metán kerül a levegőbe, és távlatilag jelentős metánforrás lehet a nagyrészt a sekélyebb sarki tengerekben, a kontinentális talapzaton elhelyezkedő hatalmas mennyiségű metánhidrát is. Az éghajlat változása gyorsíthatja a denitrifikációs folyamatokat, melyek üvegházhatású dinitrogén-oxidot juttatnak a levegőbe. A melegedő éghajlat növeli az erdő- és bozóttüzek gyakoriságát, kiterjedtségét, melyek révén ugyancsak üvegházhatású gázok kerülnek a légkörbe, miközben csökken a légkörből szén-dioxidot kivonó vegetáció mennyisége is.

A negatív visszacsatolások között említhetjük a részben az éghajlatváltozás, részben a megnövekedett szén-dioxid koncentráció által serkentett bioszferikus és a növekvő légkör-óceán koncentráció-különbség által kiváltott óceáni szén-dioxid felvételt, valamint a metánbontó kémiai reakciók gyorsulását. Ezek a folyamatok azonban korlátozottak: a növények biokémiai okok miatt csak bizonyos határig képesek kivonni, hasznosítani a többlet szén-dioxidot (amit sok esetben még a talaj tápanyagtartalma is korlátoz), az óceánok hőmérséklet-emelkedése és savasodása pedig a szén-dioxid beoldódását fékezi.

A fizikában jártas, de az éghajlati rendszert kevésbé ismerők munkáiban időről időre felbukkannak olyan számítások, melyek például a légköri szén-dioxid mennyiség növekményének energetikai hatását elemzik. Jó esetben csak értetlenül nézik, hogy az jóval kisebb, mint ami megmagyarázná a tapasztalt éghajlatváltozást, míg rosszabb esetben megkérdőjelezzik, hogy valóban a többlet szén-dioxid mennyiség lenne az éghajlatváltozás fő oka. Fizikailag-matematikailag helyes számítások esetén az eltérést a fent vázolt, egyáltalán nem elhanyagolható erősségű visszacsatolások figyelmen kívül hagyása okozza. A spektrális számításokból az következik, hogy a légköri szén-dioxid szint megduplázódása önmagában kb. 1 °C-os globális átlaghőmérséklet emelkedést okozna (Etminan *et al.*, 2016). Az ettől elválaszthatatlan visszacsatolások miatt azonban 2,6–3,9 °C-os melegedéssel és ennek következményeivel kell szembenéznünk (Sherwood *et al.*, 2020). Máig a légkör szén-dioxid koncentrációja az intenzív

iparosítás előtti időszakához képest kb. 50%-kal nőtt, jelentősen emelkedett más üvegházhatású gázok légköri mennyisége is, míg a globális átlaghőmérséklet emelkedése 1,5 °C körül jár, ami összhangban van a visszacsatolások eredő erősítő hatásával.

A Föld termosztátja

Rövid távon az aktív éghajlatalakító tényezők közül sem a kozmikus (naptevékenység, a Föld pályaelemeinek megváltozása), sem a geológiai (kontinensvándorlás, hegységképződés, vulkanizmus) tényezők nem tudják érdemben megváltoztatni a Föld éghajlatát a folyamatok lassúsága miatt. A légkör összetétele azonban gyorsan változhat, a zömmel pozitív visszacsatolások miatt pedig még a viszonylag kis változások is jelentős éghajlatváltozást eredményezhetnek. A légkör üvegházhatásának mintegy háromnegyedét a vízgőz (+felhőzet) adja (Schmidt *et al.*, 2010). Légköri mennyisége azonban magától a bolygó hőmérsékletétől függ, ezért éghajlatváltozást nem tud elindítani. Mennyisége csak egy más okból megindult éghajlatváltozás hatására változhat. Bármilyen többlet, például vulkánkitörésből, gyorsabban kikondenzálódik a légkörből, mint hogy éghajlatváltozást okozhatna. Hasonló a helyzet a bolygót potenciálisan hűtő aeroszolrészecskékkel is, melyek a troposzférából egy-két hét alatt kikerülnek, de a nagyobb vulkánkitörések révén a sztratoszférába jutó vagy a vulkáni gázokból ott képződő részecskék sem maradnak tovább a légkörben néhány évnél (Toohey *et al.*, 2025). Folyamatos utánpótlás nélkül (lásd pl. ipari tevékenység) éghajlatváltozást nem okozhatnak. A nem kondenzálódó üvegházhatású gázok közül mennyiségi okokból a szén-dioxid gyakorolja messze a legnagyobb hatást az éghajlatra, melynek részesedése az üvegházhatásban körülbelül 20% (Schmidt *et al.*, 2010). Légköri mennyisége két nagyságrenddel haladja meg a második legnagyobb hatású nemkondenzálódó üvegházhatású gáz, a metán mennyiségét (CO₂: 420 ppm; CH₄: 2 ppm), ami bőven ellensúlyozza a metán fajlagosan nagyobb energiaelnyelését, emellett potenciálisan megváltozó forráshozama is lényegesen meghaladja a metánét. Összességében kimondhatjuk, hogy a jelenlegi viszonyok között rövidebb időskálán elsősorban a szén-dioxid szabályozza a Föld éghajlatát, a szén-dioxid a Föld „termosztátja”. Kibocsátásának csökkentésével „lejjebb tekerhetnénk” ezt a termosztátot, mérsékelve az ökológiai rendszereket (benne az emberiséget) fenyegető gyors éghajlatváltozást.

A pozitív visszacsatolásokat látva és bolygósomzédunkra, a Vénuszra nézve felmerülhet, hogy vajon nem szabadulhat-e el az üvegházhatás a Földön is? Ehhez olyan pozitív visszacsatolás kellene, amely legalább 100%-os hatásfokú (egységnyi hatásra >1-szeres válasz), melynél az erősítési tényező matematikailag végtelenné válik. A hőmérséklettől exponenciálisan függő vízgőztartalom bizonyos hőmérséklet felett elvileg előidézhethetné ezt az öngerjesztő folyamatot, a kritikus hőmérsékleti szint előidézéséhez azonban olyan nagy mennyiségű szén-dioxidnak és metánnak kellene a levegőbe kerülnie, amennyi nem áll rendelkezésre (Russell et al., 2013). A Földön zajló lemeztektonikai folyamatok jóvoltából az évmilliárdok során a földi szénkészlet szinte teljes egészében a földkéregbe, illetve a mélyebb rétegekbe került. A felszabadítható, potenciálisan a légkörbe jutható szénmennyiség önmagában kevés az üvegházhatás elszabadításához. Ezzel együtt az erősödő üvegházhatás a bolygó hőmérsékletét a jelenleginél jóval magasabbra is emelheti. 56 millió éve, a paleocén-eocén hőmérsékleti maximum idején, a globális átlaghőmérséklet 27–34 °C között lehetett (Inglis et al., 2020), szemben a jelenlegi ~15 °C-kal.

Irodalom

- Allan, R.P., Willett, K.M., John, V.O., Trent, T., 2022. Global Changes in Water Vapor 1979–2020. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 127, e2022JD036728, doi: <https://doi.org/10.1029/2022JD036728>
- Amdur, T., Stine, A.R., Huybers, P., 2021. Global Surface Temperature Response to 11-Yr Solar Cycle Forcing Consistent with General Circulation Model Results. *Journal of Climate* 34, 2893–2903, doi: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0312.1>
- Ångström, K., 1900. Ueber die Bedeutung des Wasserdampfes und der Kohlensäure bei der Absorption der Erdatmosphäre (angol fordítás). *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
- Bloch-Johnson, J., Rugenstein, M., Stolpe, M.B., Rohrschneider, T., Zheng, Y., Gregory, J.M., 2021. Climate Sensitivity Increases Under Higher CO₂ Levels Due to Feedback Temperature Dependence. *Geophysical Research Letters* 48, e2020GL089074, doi: <https://doi.org/10.1029/2020GL089074>
- Chatzistergos, T., Krivova, N.A., Yeo, K.L., 2023. Long-term changes in solar activity and irradiance. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 252, 106150, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2023.106150>
- Cséplő, A., Izsák, B., Geresdi, I., 2022. Long-term trend of surface relative humidity in Hungary. *Theoretical and Applied Climatology* 149, 1629–1643, doi: 10.1007/s00704-022-04127-z
- Davies, J.H., Davies, D.R., 2010. Earth's surface heat flux. *Solid Earth* 1, 5–24.
- Drótos, G., Herein, M., Haszpra, T., Jánosi, I.M., 2024. Converged ensemble simulations of climate: possible trends in total solar irradiance cannot explain global warming alone. *Frontiers in Earth Science* 12, doi: 10.3389/feart.2024.1240784
- Etmann, M., Myhre, G., Highwood, E.J., Shine, K.P., 2016. Radiative forcing of carbon dioxide, methane, and nitrous oxide: A significant revision of the methane radiative forcing. *Geophysical Research Letters* 43, 12,614–12,623, doi: 10.1002/2016gl071930
- Gimeno, L., Eiras-Barca, J., Durán-Quesada, A.M., Dominguez, F., van der Ent, R., Sodemann, H., Sánchez-Murillo, R., Nieto, R., Kirchner, J.W., 2021. The residence time of water vapour in the atmosphere. *Nature Reviews Earth & Environment* 2, 558–569, doi: 10.1038/s43017-021-00181-9
- Goessling, H.F., Bathiany, S., 2016. Why CO₂ cools the middle atmosphere – a consolidating model perspective. *Earth Syst. Dynam.* 7, 697–715, doi: 10.5194/esd-7-697-2016
- Goessling, H.F., Rackow, T., Jung, T., 2025. Recent global temperature surge intensified by record-low planetary albedo. *Science* 387, 68–73, doi: 10.1126/science.adq7280
- Haszpra, L., 2022. Metán a légkörben: kockázatok és lehetőségek. *Légkör* 67, 70–76, doi: 10.56474/legkor.2022.2.1
- Inglis, G.N., Bragg, F., Burls, N.J., Cramwinckel, M.J., Evans, D., Foster, G.L., Huber, M., Lunt, D.J., Siler, N., Steinig, S., Tierney, J.E., Wilkinson, R., Anagnostou, E., de Boer, A.M., Dunkley Jones, T., Edgar, K.M., Hollis, C.J., Hutchinson, D.K., Pancost, R.D., 2020. Global mean surface temperature and climate sensitivity of the early Eocene Climatic Optimum (EECO), Paleocene–Eocene Thermal Maximum (PETM), and latest Paleocene. *Clim. Past* 16, 1953–1968, doi: 10.5194/cp-16-1953-2020
- Jeevanjee, N., Held, I., Ramaswamy, V., 2022. Manabe's Radiative–Convective Equilibrium. *Bulletin of the American Meteorological Society* 103, E2559–E2569, doi: 10.1175/bams-d-21-0351.1
- Kostadinov, T.S., Gilb, R., 2014. Earth Orbit v2.1: a 3-D visualization and analysis model of Earth's orbit, Milankovitch cycles and insolation. *Geoscientific Model Development* 7, 1051–1068, doi: 10.5194/gmd-7-1051-2014
- Kuchar, A., Sacha, P., Mikovsky, J., Pisoft, P., 2015. The 11-year solar cycle in current reanalyses: a (non)linear attribution study of the middle atmosphere. *Atmos. Chem. Phys.* 15, 6879–6895, doi: 10.5194/acp-15-6879-2015
- Li, R., Jian, B., Li, J., Wen, D., Zhang, L., Wang, Y., 2024. Understanding the trends in reflected solar radiation: a latitude- and month-based perspective. *Atmos. Chem. Phys.* 24, 9777–9803, doi: 10.5194/acp-24-9777-2024

- Lindsey, R., 2021. Climate Change: Incoming Sunlight. NOAA Climate.gov <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-incoming-sunlight>, Utoljára megtekintve: 2025. február 24.
- Liu, R., Su, H., Liou, K.-N., Jiang, J.H., Gu, Y., Liu, S.C., Shiu, C.-J., 2018. An Assessment of Tropospheric Water Vapor Feedback Using Radiative Kernels. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 123, 1499-1509, doi: <https://doi.org/10.1002/2017JD027512>
- Manabe, S., Strickler, R.F., 1964. Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Convective Adjustment. *Journal of Atmospheric Sciences* 21, 361-385, doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1964\)021<0361:TEOTAW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1964)021<0361:TEOTAW>2.0.CO;2)
- Manabe, S., Wetherald, R.T., 1967. Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity. *Journal of the Atmospheric Sciences* 24, 241-259, doi: [10.1175/1520-0469\(1967\)024<0241:teotaw>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1967)024<0241:teotaw>2.0.co;2)
- Previdi, M., Liepert, B.G., Peteet, D., Hansen, J., Beerling, D.J., Broccoli, A.J., Frothing, S., Galloway, J.N., Heimann, M., Le Quéré, C., Levitus, S., Ramaswamy, V., 2013. Climate sensitivity in the Anthropocene. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 139, 1121-1131, doi: [10.1002/qj.2165](https://doi.org/10.1002/qj.2165)
- Prša, A., Harmanec, P., Torres, G., Mamajek, E., Asplund, M., Capitaine, N., Christensen-Dalsgaard, J., Depagne, É., Haberleiter, M., Hekker, S., Hilton, J., Kopp, G., Kostov, V., Kurtz, D.W., Laskar, J., Mason, B.D., Milone, E.F., Montgomery, M., Richards, M., Schmutz, W., Schou, J., Stewart, S.G., 2016. Nominal values for selected solar and planetary quantities: IAU 2015 Resolution B3. *The Astronomical Journal* 152, 41, doi: [10.3847/0004-6256/152/2/41](https://doi.org/10.3847/0004-6256/152/2/41)
- Russell, G.L., Lacis, A.A., Rind, D.H., Colose, C., Opstbaum, R.F., 2013. Fast atmosphere-ocean model runs with large changes in CO₂. *Geophysical Research Letters* 40, 2013GL056755, doi: [10.1002/2013gl056755](https://doi.org/10.1002/2013gl056755)
- Schmidt, G.A., Ruedy, R.A., Miller, R.L., Lacis, A.A., 2010. Attribution of the present-day total greenhouse effect. *J. of Geophysical Research* 115D, D20106, doi: [10.1029/2010JD014287](https://doi.org/10.1029/2010JD014287)
- Sherwood, S.C., Webb, M.J., Annan, J.D., Armour, K.C., Forster, P.M., Hargreaves, J.C., Hegerl, G., Klein, S.A., Marvel, K.D., Rohling, E.J., Watanabe, M., Andrews, T., Braconnot, P., Bretherton, C.S., Foster, G.L., Hausfather, Z., von der Heydt, A.S., Knutti, R., Mauritsen, T., Norris, J.R., Proistosescu, C., Rugenstein, M., Schmidt, G.A., Tokarska, K.B., Zelinka, M.D., 2020. An Assessment of Earth's Climate Sensitivity Using Multiple Lines of Evidence. *Reviews of Geophysics* 58, e2019RG000678, doi: <https://doi.org/10.1029/2019RG000678>
- Solar Influences Data Analysis Center, 2025. Total Solar Irradiance. <https://www.sidc.be/observations/space-based-timelines/tsi>, Utoljára megtekintve 2025. február 20.
- Toohey, M., Jia, Y., Khanal, S., Tegtmeier, S., 2025. Stratospheric residence time and the lifetime of volcanic stratospheric aerosols. *Atmos. Chem. Phys.* 25, 3821-3839, doi: [10.5194/acp-25-3821-2025](https://doi.org/10.5194/acp-25-3821-2025)
- Usoskin, I.G., 2023. A history of solar activity over millennia. *Living Reviews in Solar Physics* 20, 2, doi: [10.1007/s41116-023-00036-z](https://doi.org/10.1007/s41116-023-00036-z)
- von Schuckmann, K., Minière, A., Gues, F., Cuesta-Valero, F.J., Kirchengast, G., Adusumilli, S., Straneo, F., Ablain, M., Allan, R.P., Barker, P.M., Beltrami, H., Blazquez, A., Boyer, T., Cheng, L., Church, J., Desbruyeres, D., Dolman, H., Domingues, C.M., García-García, A., Giglio, D., Gilson, J.E., Gorfer, M., Haimberger, L., Hakuba, M.Z., Hendricks, S., Hosoda, S., Johnson, G.C., Killick, R., King, B., Kolodziejczyk, N., Korosov, A., Krinner, G., Kuusela, M., Landerer, F.W., Langer, M., Lavergne, T., Lawrence, I., Li, Y., Lyman, J., Marti, F., Marzeion, B., Mayer, M., MacDougall, A.H., McDougall, T., Monselesan, D.P., Nitzbon, J., Otsuka, I., Peng, J., Purkey, S., Roemmich, D., Sato, K., Savita, A., Schweiger, A., Shepherd, A., Seneviratne, S.I., Simons, L., Slater, D.A., Slater, T., Steiner, A.K., Suga, T., Szekeely, T., Thiery, W., Timmermans, M.L., Vanderkelen, I., Wjiffels, S.E., Wu, T., Zemp, M., 2023. Heat stored in the Earth system 1960–2020: where does the energy go? *Earth Syst. Sci. Data* 15, 1675-1709, doi: [10.5194/essd-15-1675-2023](https://doi.org/10.5194/essd-15-1675-2023)
- Wan, N., Lin, X., Pielke Sr, R. A., Zeng, X., Nelson, A. M., 2024: Global total precipitable water variations and trends over the period 1958–2021. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 28, 2123-2137, doi: [10.5194/hess-28-2123-2024](https://doi.org/10.5194/hess-28-2123-2024)
- Wild, M., Folini, D., Hakuba, M., Schär, C., Seneviratne, S., Kato, S., Rutan, D., Ammann, C., Wood, E., König-Langlo, G., 2015. The energy balance over land and oceans: an assessment based on direct observations and CMIP5 climate models. *Climate Dynamics* 44, 3393-3429, doi: [10.1007/s00382-014-2430-z](https://doi.org/10.1007/s00382-014-2430-z)
- Zhou, J., Tung, K.-K., 2013. Observed Tropospheric Temperature Response to 11-yr Solar Cycle and What It Reveals about Mechanisms. *Journal of the Atmospheric Sciences* 70, 9-14, doi: <https://doi.org/10.1175/JAS-D-12-0214.1>