

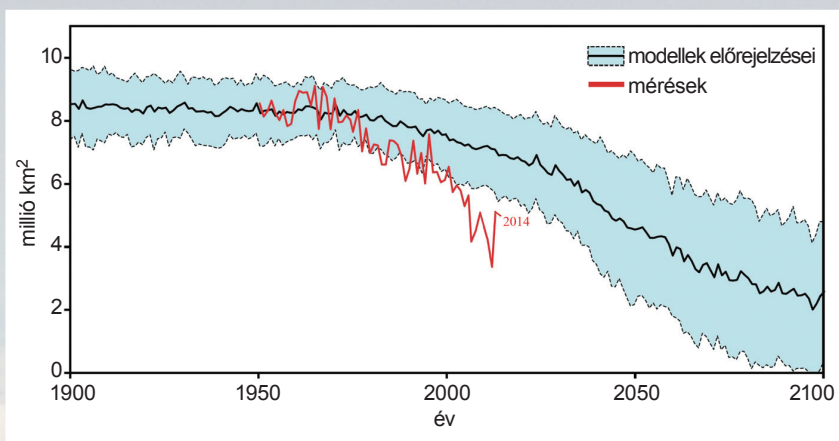
MIÉRT OLVADNAK A JÉGSAPKÁK?

Napjainkban a közvélemény a globális éghajlatváltozás – elterjedtebb, de pontatlan nevén a globális felmelegedés – jeleit szinte kizárólag a Föld felszíni átlaghőmérsékletének emelkedésében keresi. A földi átlaghőmérséklet az elmúlt 150 év alatt kb. 0,6 °C-ot emelkedett az 1961 és 1990 közötti időszak, az éghajlati alapskála átlagértékéhez képest. Ez talán nem tűnik jelentősnek ahhoz, hogy bárkiben is aggodalmat keltsen – van azonban a Földnek olyan régiója, ahol az eddig bekövetkezett változások, köztük a hőmérséklet emelkedése az átlagnál lényegesen jelentősebbek.

Ez a terület pedig az Arktisz, az északi sarkvidék. Az itt található mérőállomások adatai alapján például 2006-ban az áprilisi átlaghőmérséklet +12 °C-kal haladta meg az éghajlati átlagot. Ezen adatoknál is látványosabb a tengerjég visszahúzódása a nyári időszak végére. A tengerjég minimális kiterjedése a műholdas mérések kezdete óta 8,3 millió km²-ről napjainkra 5 millió km² alá csökkent. Legkisebb kiterjedését 2012 különösen meleg nyarán érte el, a tengerjég 2012. szeptember 16-án mindössze 3,41 millió km²-t borított. A tengerjég vastagságából is jelentősen vesztett: míg 1980-ban átlagosan 3,6 méter vastag volt, addig 2008-ban már csak 1,9 méter. Különösen aggasztó, hogy az éghajlati modellek, amelyek a jövőbeni éghajlatváltozás előrejelzésére szolgálnak, még visszamenőleg sem tudják pontosan leírni a jégtakaró állapotváltozásait. Az éghajlati modellek többsége szerint a jég kiterjedésének a megfigyelthez képest sokkal lassabban kellene csökkennie, a jégtakaró egy részének még ezen évszázad végére is meg kellene maradnia. A műholdas észlelések szerint azonban a nyári jég véstesen fogy: egyes kutatók szerint már a 2040-es években eltűnhet nyaranta a tengeri jég az Arktisról.

A hó sötét oldala

Az úszó jég eltűnése nemcsak a jegesmedvék és más élőlények élőhelyét fenyegeti, hanem a Föld bolygó globális energiaforgalmára is közvetlen hatással van. A hó- és jégfelszín ugyanis rendkívül hatékonyan veri vissza a világot



Az Arktisz tengeri jegének minimális kiterjedése műholdas megfigyelések adatai és éghajlati modellek számításai alapján

felé a Naptól érkező sugárzást: ez a vakító jelenség – ami szélsőséges esetben hóvakságot is okozhat – minden téli sportot kedvelő ember számára ismert. Ha a jég elolvad, és helyette a beérkező napsugárzás a tengerfelszínnel találkozik, akkor a fény visszaverődésének határfoka már lényegesen kisebb, következtetésképpen a felszínen jóval több fényenergia nyelődik el. Négyzetkilométerenként az elnyelt átlagos többleteljesítmény 250 MW, azaz egy közepes méretű hőerőmű névleges teljesítménye. Az elnyelt többletenergia hatására a tengerfelszín és a levegő is melegszik, ami hozzájárul a jég gyorsabb olvadásához, további vízfelületek szabaddá válásához és további többletenergia elnyelődéséhez. Ezt az önmagát erősítő folyamatot pozitív visszacsatolásnak nevezzük. Az ilyen természetű folyamatokkal kis kezdeti beavatkozással viszonylag rövid idő

alatt nagy változásokat lehet elérni. Tavasi hóolvadáskor egy verőfényes napon bárki kipróbálhatja, hogy milyen gyorsan olvad a hóréteg sötét felszínnel érintkező oldala.

Az elmúlt 2 millió évben a nagy eljegesedések és a közties melegebb időszakok (interglaciálisok) váltakozásait a sarkvidék felől kiinduló hasonló visszacsatolások segítették elő. A visszacsatolások mindkét irányban hatékonyan működtek, kiváltó okai pedig a Föld Nap körüli keringésében szabályszerűen ismétlődve (periodikusan) bekövetkező, csillagászati léptékben csekély mértékű változások voltak. Legnagyobb szerepe a Föld keringési pályájának 100 ezer évente történő megváltozásának volt: a legutolsó, 115 ezer éve kezdődő jégkorszakot az indította el, hogy a Föld elliptikus pályája kissé módosult, és a Föld pályája legtávolabbi pontjának közelében (nyaranta) egyre

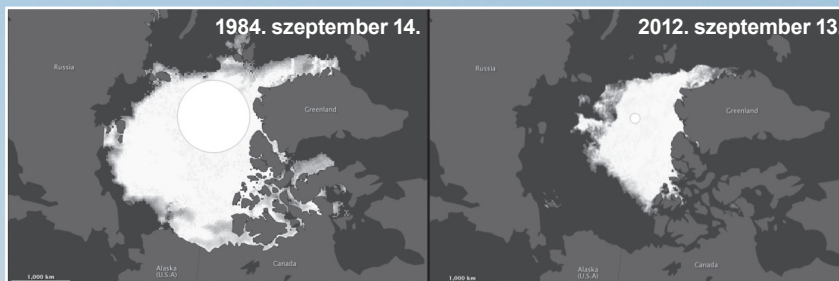
kevesebb sugárzás érte az északi sarkkör vidékét. A változást már négyzetméterenként <1 Watt sugárzási teljesítménysökkenés is képes lehetett megindítani. Ennek következtében a télen képződött jég később és kevésbé tudott megolvadni, egyre nagyobb területen verte vissza a Nap sugárzását, amelynek következtében egyre kiterjedő régió egyre kevesebb energiához jutott. A csökkenő hőmérséklettel a légkörben a vízgőz, a szén-dioxid és a metán koncentrációja is csökkent, ami gyengítette a természetes üvegházhatást és további hőmérsékletcsökkenéshez vezetett.

A folyamatot természetesen a Naptól való távolság további növekedése és az ebből adódó egyre kisebb nyári besugárzás is erősítette, sőt később ennek a hatása lett a legnagyobb. A részben ön-erősítő folyamat végén Európa nagy részét körülbelül az 55. szélességi fokig (a mai Lengyelország déli határárig) 3-4 kilométer vastag jégtakaró borította, ami véglegesen mindössze 9 ezer évvel ezelőtt tűnt el. Eltűnését éppúgy, mint a kialakulását a Föld kerületi pályájának újbóli változása, a nyári besugárzás intenzitásának újbóli növekedése és az általa megindított ellen-erősítő irányú visszacsatolási folyamatok okozták.

Láthatjuk tehát, hogy a jégtakaró ön-erősítő folyamatai mennyire meghatározóak voltak a földtörténeti közelmúltban Földünk éghajlatváltozásainak megindításában. Az éghajlatot hosszabb ideig tartó barátságtalan jégkorszakok (Magyarországot ekkor tundra borította), és rövidebb időtartamú melegebb időszakok váltakozása jellemezte (jelenleg is egy ilyen, egyelőre ismeretlen okból meghosszabbított kellemes éghajlatú időszakban élünk).

Szennyezett sarkok

Az Arktisz vidéke már korántsem a tiszta levegő birodalma, amint az még az első felfedező útleírásaiban szerepelt. Az 1950-es években a kanadai Arktisz fölött áthaladó repülőgépek pilótái figyeltek fel arra, hogy a tél végi,



Az arktiszi tengeri jég minimális kiterjedésének változása műholdfelvételeken kevesebb mint 20 év alatt

kora tavaszi hónapokban az Arktisz hatalmas területeit tartós, szabad szemmel is jól megfigyelhető szmog borítja. De még legalább két évtizednek kellett eltelnie ahhoz, hogy nyilvánvalóvá váljon, ez a szmog ténylegesen a környező kontinensek területéről oda-szállított és megrekedt levegőszennyezés. Megtalálhatók benne a kén-

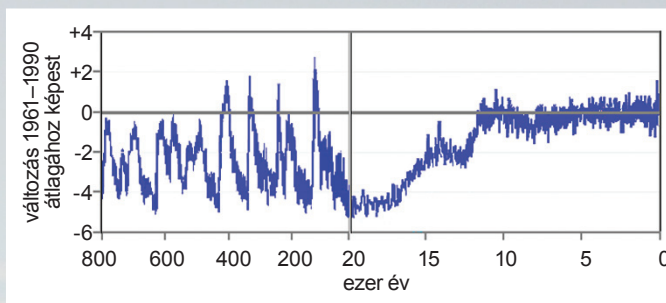
illetve a jég által elnyelt sugárzási energia mennyisége megnövekszik, ami növeli a hőmérsékletet és elősegíti az olvadást. Ez egybevág azzal a hétköznapi megfigyeléssel, mely szerint a piszkos hó gyorsabban olvad, mint a vakítóan tiszta.

Tavasszal, illetve nyáron a meteorológiai viszonyok miatt a kontinensek felett a levegőszennyezés még könnyebben elérheti az Arktiszt. A tavaszi hónapokban a koromrészecskék fő forrása a Kelet-Európában elterjedt mezőgazdasági hulladékégetés. Az Arktisz felett az eddig megfigyelt legnagyobb koncentrációjú szmog 2006 tavaszán alakult ki a balti államokban, Fehéroroszországban és Ukrajnában égő mezőgazdasági tüzek füstjéből. Különösen meleg és száraz nyarakon a Kanadában és Oroszországban szinte meg-

fékezhetetlenül tomboló hatalmas erdőtüzek füstje okoz a sarkkörön belül súlyos levegőszennyezést. A sarkvidék hőmérséklete nyaranta a globális átlagnál legalább kétszer gyorsabban emelkedik, az erdőtüzek gyakorisága és kiterjedése folyamatosan növekszik. Ez is egyfajta öngerjesztő folyamat, pozitív visszacsatolás. 2014 nyarán Kanadában háromszor akkora területen pusztítottak erdőtüzek, mint az elmúlt 25 év átlaga. Az erdőtüzek drámai következménye Grönland gleccsereinek még a média ingerküszöbét is elérő feketedése volt, amely minden korábbi rekordot megdöntött.

Nincs termosztát

De hol tartunk most? A konzervatív, a legújabb megfigyelések eredményeivel még nem számoló tudományos számítások szerint az Arktisz tengeri jégének és Grönland gleccsereinek átlagos fel-



Az Antarktisz rekonstruált felszíni hőmérséklete az elmúlt 800 ezer évben a Dome Concordia-kutatóállomáson mélyített jégfúrások alapján készült mérési eredmények alapján

dioxid átalakulásából származó szulfát-, a nitrogén-oxidokból származó nitrátrészecskék, valamint jelentős mennyiségben korom.

A tökéletlen égésből származó koromrészecskék rendkívül hatékonyan képesek elnyelni és hőenergiává alakítani a napsugárzást, amit a levegő gáznemű alkotói átengednek: 1 gramm koromrészecske a légkörben 1 hét alatt egy átlagos magyar háztartás egyheti energiaszükségletét megtermeli! De a korom még azt követően is hatékony fényelnyelő anyag marad, miután kiüledett a légkörből a hó- vagy jégfelszínre. A korommal szennyezett jégfelszín napsugárzás-visszaverő képessége (albedója) a korom koncentrációjától függően jelentősen csökken: már 25 nanogrammm/gramm koncentrációban (25 az egymilliárdhoz arányban) is 2%-kal csökkenti a jégfelszín albedóját. Ennek következtében a hó,



Nagy felbontású műholdas felvétel szennyezett hófelszínről és a mellette felállított kutató táborhelyről

színi koromtartalma 10–50 ng/g, az ebből számított elnyelt többleteljesítmény $+0,3 \text{ W/m}^2$. Ha ehhez hozzávesszük az üvegházhatású gázok koncentrációjának növekedéséből a régióra számítható többletsugárzási teljesítményt ($+0,4 \text{ W/m}^2$), ezek együttes összege már megközelíti azt az értéket ($<1 \text{ W/m}^2$), ami a múltban képes volt jelentős éghajlatváltozásokat megindítani és pozitív visszacsatolási mechanizmusokat aktiválni. Ahhoz kétség sem férhet, hogy manapság az égési folyamatok alapvetően emberi tevékenységhez kötődnek, még a hatalmas erdőtüzeket is – szándékosan vagy gondatlanul – az ember idézi elő. Így a levegőszennyezésen keresztül, alapvető és könnyen belátható fizikai összefüggések révén az emberiség már napjainkban is akkora hatást gyakorol a sarkvidék sugárzási energiámérlegére, mint azt korábban a drámai éghajlatváltozásokat elindító csillagászati tényezők tettek. Csak éppen lényegesen rövidebb idő alatt. A földtörténeti múltban több száz évre volt szükség hasonló mértékű teljesítményváltozás eléréséhez, mint ami most néhány évtized alatt bekövetkezett. A változás iránya is szokatlan. Az elmúlt 800 ezer évben interglaciálisok után mindig lehűlés következett: korábban még nem volt példa arra, hogy egy interglaciális további felmelegedés kövessen (sőt még arra sem, hogy a magasabb hőmérséklet tartósan fennmaradjon, a legutóbbi 11 ezer év, a holocén kivételével).

A különbség abban is megnyilvánul, hogy míg korábban a hőmérsékletváltozásokat az üvegházhatású gázok koncentrációjának változása mintegy 800 év időeltolódással követte, addig napjainkban az üvegházhatású gázok koncentrációjának növekedése megelőzi a hőmérséklet emelkedését. Az üvegházhatású gázok koncentrációjának növekedése egyértelműen az ember tevékenységének következménye. A szén-dioxid és a metán légköri koncentrációja ezáltal kilépett az elmúlt 800 ezer évben (sőt vélhetően az elmúlt 15 millió évben) jellemző tartományból: a szén-dioxid jelenlegi koncentrációja 400 ppm (1 ppm = 1 milliomodrész), míg a negyedidőszakban 170 és 310 ppm között változott. A metánra ugyanez az érték jelenleg 1,8 ppm, a korábbi tartomány 0,3–0,7 ppm. A számítások szerint azonban a sarkvidéken tapasztalható felmelegedést nem elsősorban az üvegházhatású gázok koncentrációjának növekedése okozza. A közvetlen levegőszennyezésből származó koromrészecskék szerepe legalább akkora, ha nem nagyobb, és egyre növekvő mértékben érvényesül a jégfelszín kiterjedésének zsugorodásához és más nagyléptékű kölcsönhatásokhoz köthető, részleteiben kevésbé ismert fizikai visszacsatolási folyamatok hatása is.

Az északi sarkvidék, noha szerepe nem elhanyagolható a Föld globális energiámérlegének szabályozásában

sem (a hó- és jégfelszínről történő energia-visszaverődés a Föld felszínét elérő sugárzási energiámennyiség 6%-a), elsősorban az északi félgömb mérsékelt égövi és sarkvidéki területei időjárásának alakításában játszik meghatározó szerepet. A sarkvidéken lejátszódó folyamatok természetesen nem függetlenek a Föld más természeti rendszereinek működésétől sem, elsősorban az óceáni áramlásokkal vannak kölcsönhatásban. Az itt tapasztalható változások a Föld-légkör rendszer jövőbeni működését is befolyásolhatják.

Bolygónk éghajlati rendszerében tehát – legalábbis évtizedes-évszázados időskálán – nincsenek hatékony fékező-stabilizáló mechanizmusok (negatív visszacsatolási folyamatok), nincs jól működő földi „termosztát”. Más szavakkal az elmúlt 2 millió év nagy éghajlati ingadozásai arra tanítottak meg bennünket, hogy amikor az éghajlati rendszer kibillent adott állapotából, akkor öngerjesztő folyamatai révén még emberi léptékekkel mérve is rendkívül gyorsan megszaladt. Márpedig a sugárzási mérleg egyensúlyát az emberiség máris jelentős mértékben megváltoztatta. Ez az emberiség által indukált vagy inkább kiprovokált jövőbeni éghajlatváltozás legnagyobb kockázata. Nem feltétlenül a közvetlenül látható jövőben, de nemlineáris nagy rendszereknél a hirtelen változás sem kizárt. Ha több száz, vagy ezer év múlva áll csak be egy kedvezőtlenül szélsőséges éghajlati állapot, a jelen generációjának akkor is megkerülhetetlen az erkölcsi felelőssége. Csak egy dolgot tudhatunk biztosan: azt, hogy az éghajlati rendszer működéséről meglevő ismereteink rendkívül hézagosak, ezért a jövőbeni éghajlatváltozások mértéke és következményei egyelőre tudományos igényvel és felelősséggel megjósolhatatlanok.

GELENCSÉR ANDRÁS

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