

MIKA JÁNOS

A klímaváltozás vizsgálata műholdas távérzékeléssel

Az éghajlat megannyi változóját elsősorban műholdokról lehet megfelelő térbeli és időbeli sűrűséggel, globális fedésben megfigyelni. Gyakorlatilag minden fontos éghajlati paramétert meg tudunk figyelni műholdokról, azonban ezek pontossága és rendszeressége (pl. a felhőzet zavaró hatása miatt) nem mindig azonos a felszín-bázisú eljárásokéval.

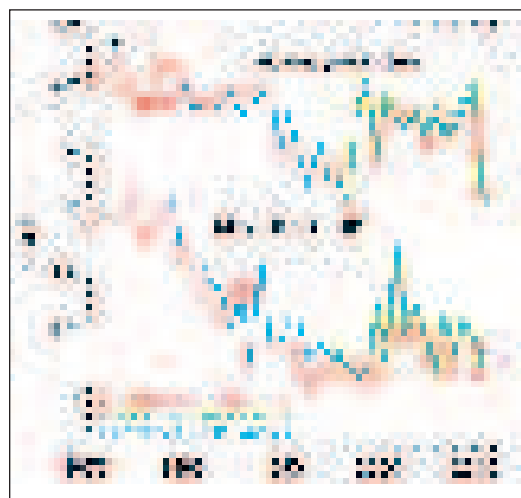
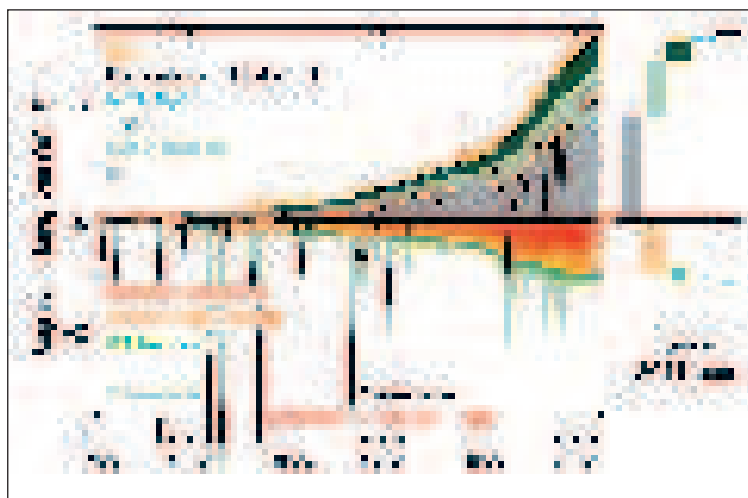
Nemrég e lap hasábjain a meteorológiai használt műholdas eszközökre kon-

nyomozva ezek okait. Végül az írásunk záró fejezetében bemutatott többféle vizsgálat a klímamodellek működését ellenőrzi. E fejezet része a jelen éghajlatának reprodukciójának ellenőrzése, illetve annak megítélése, hogy megfelelő-e az éghajlat érzékenysége (a külső tényezők módosulása által kiváltott változásnak) a szimulálása. Ezt a fejezetet annak ellenőrzése zárja, hogy a klímamodellek mennyire képesek visszaadni az éghajlat megfigyelt évtizedes változásait.

törések), de vannak emberi eredetűek is (pl. üvegházhatású gázok, aeroszolok).

A legismertebb éghajlati kényszer, a felmelegedésért nagy valószínűséggel felelős üvegházhatású gázok térbeli eloszlása igen egyenletes, ezért a ritka és egyenetlen felszíni hálózattal is megbízhatóan mérhető. Emiatt az ilyen gázok monitorozása nem kiemelt célja a műholdas méréseknek.

Ezzel szemben, az aeroszol-részecskék nagy térbeli és időbeli ingadozást mutatnak,



1. ábra. (a) A természetes és antropogén éghajlati kényszerek együttes alakulása 1750 és 2011 között. A sugárzási mérlegben kifejezett változásokat és azok 5–95%-os bizonytalansági (konfidencia) sávjait 2011-re az ábra jobb szélé összegezi. Ezekből számítva, a teljes antropogén hatás 2011-ben $2,29 \text{ Wm}^{-2}$. (Strat: sztratoszféra, Trop: troposzféra.) (IPCC, 2013: Fig. 8.18) b) Teljes ózontartalom (Dobson Egység, $1\text{DU}=2,69 \times 10^{16} \text{ O}_3 \text{ molekula/cm}^2$) időbeli alakulása a két félteke magas szélességein a felszín-bázisú spektrométer-adatokból (WOUDC), valamint a műholdas adatokból (GOME... és BUV... projekt) márciusra ($60^\circ\text{--}90^\circ\text{N}$) és októberre ($60^\circ\text{--}90^\circ\text{S}$), azaz a legmélyebb ózonlyuk idején (IPCC, 2013: Fig. 2.6)

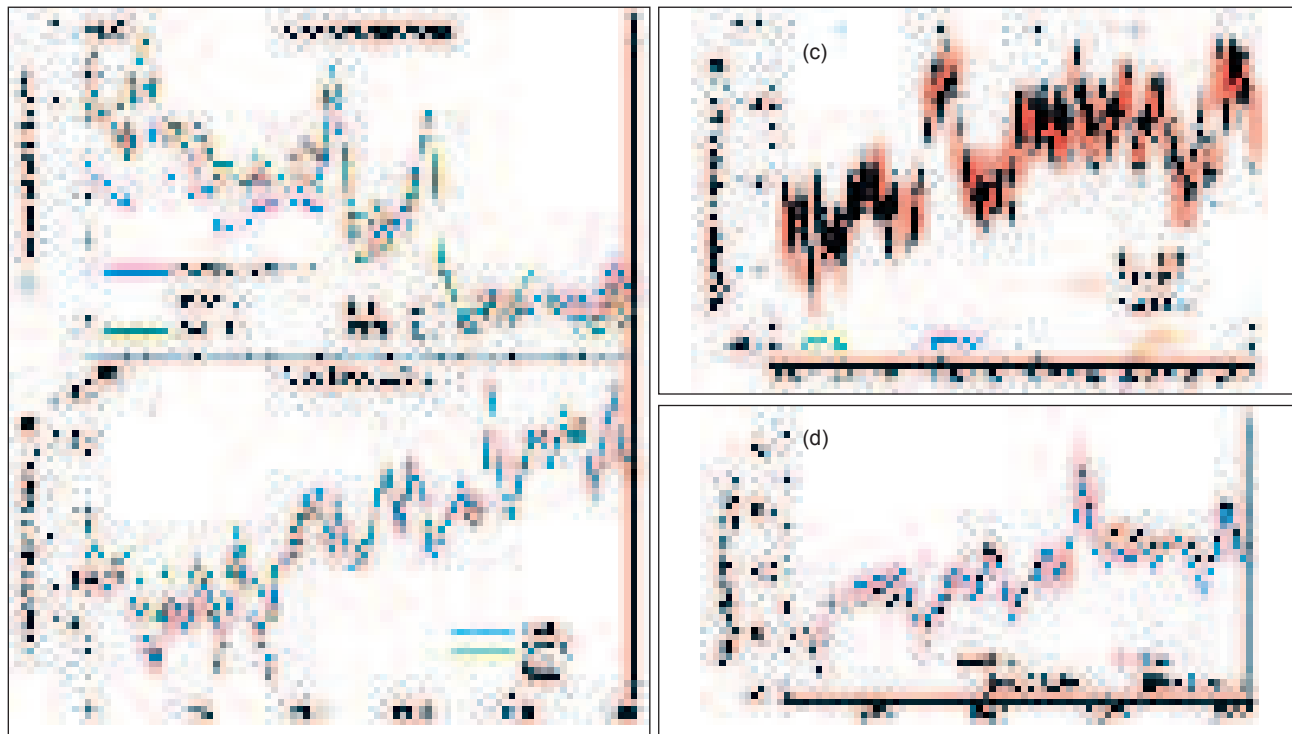
centrálunk (Kerényi és Mika, 2014), most a klímaváltozás tudományos kérdései felől közelítjük meg a témakört. Ilyen áttekintést is készítettünk már (Mika, 2008), de az még az Éghajlatváltozási Kormányközi Testület korábbi összefoglalóján (IPCC, 2007) alapult. Ezúttal minden ábra a legutóbbi Jelentésből (IPCC, 2013) származik.

Írásunk felépítése a következő: elsőként bemutatjuk az ún. éghajlati kényszerek (külső, magától az éghajlattól függetlenül változó hatótényezők) műholdokról is megfigyelt időbeli alakulását. Ezt követi az éghajlati változások illusztrálása, itt még nem

Az éghajlati kényszerek megfigyelése

Az éghajlati kényszerek olyan külső, magától az éghajlattól függetlenül változó tényezők, amelyek térben lehetnek a légkörön belül (kémiai összetétel), alatta (földhasználat) vagy fölötté (naptevékenység). A lényeg, hogy ne függjön az éghajlati rendszer (légkör, óceánok, szárazföldek, a szilárd víz alkotta krioszféra és a bioszféra) állapotától az, amire az éghajlati kényszerként tekintünk. A külső tényezők lehetnek természetesek, vagyis az emberi tevékenységtől függetlenek (pl. naptevékenység, vulkánki-

mind anyagi összetételük, mind sugárzási tulajdonságaik terén. Emiatt a napsugárzást visszafelé szóró, egyszersmind azt részben (főleg a korom esetében) elnyelő részecskék műholdas megfigyelése nagyon fontos. Nehezíti ezt a felhőzet jelenléte és az, hogy az aeroszolok minden sugárzás-átviteli tulajdonságát több hullámhosszon jellemző adatok csak a XX. század vége óta állnak rendelkezésünkre. Az aeroszolok megfigyeléséről bővebben írtunk az említett korábbi tanulmányban (Mika, 2008). Fontos hatás az, hogy az aeroszolok módosítják a felhőzet jellemzőit is, de ennek megfigyelése még nehezebb.



2. ábra. Az évi középhőmérséklet anomáliái (a) az alsó sztratoszférában és (b) az alsó troposzférában az 1981–2010-es évek átlagához viszonyítva. A két ábrán eltér az y tengely léptéke! Mindkét ábrán van 5 felszín-bázisú (rádiószondás) és 3 űr-bázisú (mikrohullámú) módszer, melyeket csak egyszer tüntetünk fel (a műholdasakat alul, a felszínieket felül). (IPCC, 2013; Fig. 2.24)

(c) A tengerfelszín hőmérséklete földi átlagban, műholdokról (ATSR) és direkt mérésekből (HadSST3) az 1961–1990 évek átlagához képest. Pontozott vonal: ATSR alapú éjszakai becslés 20 cm mélyen, az ARC projektből. (IPCC, 2013; Fig. 2.17)
 (d) A levegő vízgőztartalmának eltérése a felszín közelében g/kg egységben (tömeg ezrelékben) az 1979–2003 évek átlagától három felszíni méréseken alapuló analízis (HadISDH, HadCRUH és Dai), valamint egy ún. re-analízis (ERA-Interim) alapján. Ez utóbbi eljárás azt jelenti, hogy a sokféle adatforrásból származó megfigyeléseket a légkör fizikai egyenletrendszerével igazítják egymáshoz. E folyamat után (ami a re-analízis), a rácsponti adatokból számolnak tárbeli átlagokat (IPCC, 2013; Fig. 2.30)

A sokféle műholdas és felszínbázisú megfigyelés lehetővé teszi, hogy földi átlagban az összes *sugárzási kényszer* alakulását rekonstruáljuk (1.a ábra). A sugárzási kényszer úgy számszerűsíti a Föld-légkör rendszer sugárzási mérlegében beállt változást, hogy figyelmen kívül hagyja a rendszer igazodását. Ez a feltétel azért fontos, mert az igazodás (pl. felmelegedés) valójában ellensúlyozza a sugárzási kényszerben beálló változásokat, azaz bolygónk energiamérlege (a mérési pontosság határain belül) állandó!

A változatos megfigyeléseken alapuló, de a naptevékenység kivételével nem közvetlen méréseket, hanem modellszámításokat megjelenítő ábrán a naptevékenység az energiabevétel tetején látható, jól tükrözve a közvetlen energiaméréssel is igazolt, 11 éves ciklust. Ugyanitt, a kén-dioxidban gazdag, erős vulkánkitörésekből a sztratoszférába (11 km fölé) is feljutó, s ott kén-sav-aeroszollá alakuló gázok hatása a jelentős, de csak 1–3 évig tartó energia-vesztés. Az üvegházhatás erősödését a bevétel monoton növekedése jelöli, évti-

zedes-évszázados léptékben messze ez a legfontosabb változás.

Az 1.b ábra tanúsága szerint a légkör vertikálisan összegzett ózontartalmát is meg tudjuk becsülni műholdakról az 1970-es évek vége óta. E mérések hasonló eredményre vezetnek, mint a térben jóval ritkább, felszín-bázisú eljárások. A meglevő, néhány százaléktól tíz százaléig terjedő eltérések időben véletlenszerűek, így nem torzítják a XX. század utolsó évtizedéig mutató, addig csökkenő tendenciát.

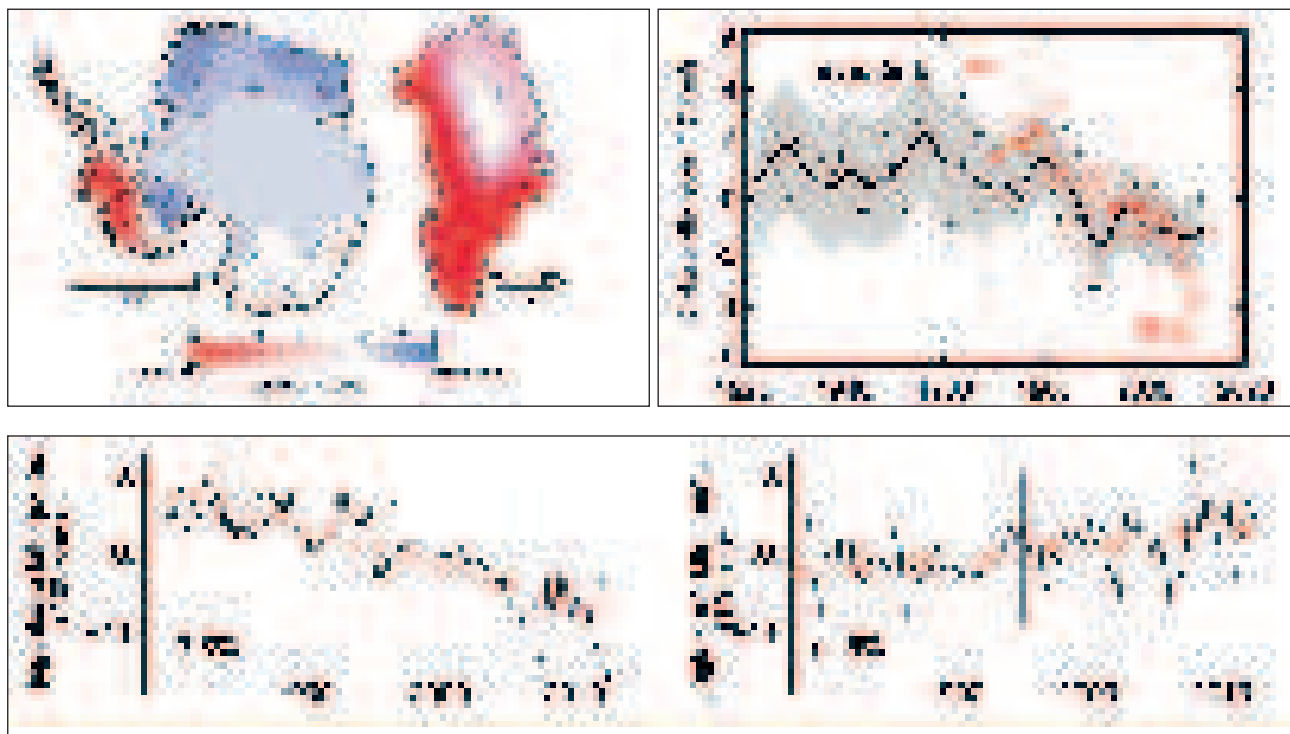
E változást kezdetben csak a déli féltekén ismertük fel, de később megjelent az északi félgömbön is. A déli féltekén mindvégig erősebb ózonhiány az Antarktisz fölött jóval alacsonyabb sztratoszferikus hőmérséklettel (az ózon 90 százaléka itt található) és az áramlás körkörös, a meridionális irányú kicserélődést gátló jellegével magyarázható. Az alacsony hőmérséklet szerepe az, hogy a kialakuló jégkristályok felülete katalizátorként felgyorsítja az ózon bomlását, aminek elsődleges okozói a halogénezett szénhidrogének.

Változások az éghajlatban

Nézzük elsőként a levegő hőmérsékletét, amit legtöbbször a felszín közelében megfigyelt adatokkal jellemezzünk. Műholdról csak a felszín kisugárzását tudjuk megfigyelni, sőt azt is csak felhőmentes, derült időben. Emiatt ilyen ábrát csak a záró fejezetben, a klímadellek tesztelése kapcsán mutatunk majd be.

Természetesen a levegő hőmérséklete nemcsak a felszínen, hanem a légkör magasabb rétegeiben is mutat változásokat, melyek mikrohullámú műholdas érzékelőkkel vizsgálhatók. E technika viszonylag vastag rétegek hőmérsékletét tudja megbecsülni úgy, hogy megméri azt a mikrohullámú sugárzást, amit az oxigénmolekulák bocsátanak ki. Az ilyen szondázás előnye, hogy a hullámok áthatolnak a felhőkön is.

Tekintsünk elsőként a 2. ábrára! Ennek bal oldalán azt látjuk, hogy körülbelül a XX. század végéig az alsó troposzféra folyamatosan melegedett, míg az alsó sztratoszféra egyértelműen hűlt. E látszólagos



3. ábra. Műholdas jégtömeg-változás (a) az Antarktisz és (b) Grönland területén (2003–2012) (IPCC, 2013: Fig. TS.3 része) (c) Direkt hótakaró-területi mérések (körök) március-áprilisban az északi féltekén, 95%-os konfidencia-intervallummal; és júniusi műholdas (kereszt) adatok. Mindkét görbe az 1971-2000-es évekhez képest értendő (IPCC, 2013: Fig. 4.19) (d) és (e) A tengeri jég kiterjedésének alakulása és évtizedes trendjei (%), kiküszöbölve az éves ciklust! Az ábrák balra (d) az Arktiszt, jobbra az Antarktiszt (e) jellemzik. A jégtakarót az 1979-2012 évek átlagához viszonyítva ábrázoltuk. Erre a megfigyelésre kizárólag műholdas adatok alapján van lehetőség! (IPCC, 2013: FAQ 4.1 Fig. 1 részlete)

ellentmondás azzal magyarázható, hogy az üvegházgázok erősödő elnyelése miatt a sztratoszférába kevesebb hosszúhullámú energia jut, mint korábban. Ugyanakkor, az ábra utolsó 10–15 évében mindkét réteg hőmérséklete stagnál, amire viszont ma még nincs egyértelmű magyarázat (lásd a záró fejezetben)!

A tengerfelszín hőmérsékletének alakulásán (2.c ábra) látható, hogy a két műholdas rekonstrukció jól együtt halad a közvetlen felszíni mérésekből interpolált adatokkal. Feltűnő ugyanakkor, hogy a megelőző évtizedben egyértelmű melegeedés a XXI. század kezdetétől itt is erősen mérséklődött.

A levegő és a vízfelszín hőmérsékletének ezt a stagnálását jól tükrözi a levegő felszínhez közeli rétegeinek vízgőztartalma (2.d ábra) is, ami főleg a párolgáson keresztül kapcsolódik a hőmérséklethez. Emellett, a levegőben kicsapódás nélkül megmaradó vízgőz maximális mennyisége is erősen, közel exponenciális függvény szerint függ a hőmérséklettől. A melegeedés így magasabbra emeli ezt a lehetséges küszöbértéket, ami szintén segíti a vízgőztartalom növekedését. Végül, a vízgőz légkörbe keveredését elősegíti az alulról melegedő légkörben fokozódó feláramlás is.

A következő ábrán a szilárd víz, a krioszféra változásaiban megnyilvánuló tendenciákat mutatunk be. A 3.a és b ábra Grönland és az Antarktisz jég hátságainak változását illusztrálja. Az ábra térképei szerint Grönlandon a jég a sziget teljes területén egyértelműen visszahúzódik, ám az Antarktisz jege jóval nagyobb területen mutat vastagodást, mint vékonyodást.

Ezt követően, nézzük a szárazföldi hótakaró alakulását (3.c ábra) az északi féltekén, amit még valamennyire meg tudunk figyelni a felszínről is, noha az észlelések területi fedettsége a sok lakatlan terület miatt nem egyenletes. A felszíni és a műholdas technika a közös időszakban jó egyezést mutat, habár az előbbi a március-áprilisi (a maximálisához közeli), míg az utóbbi a júniusi (a minimálisához közeli) kiterjedésre vonatkozik. Mindenestre, az 1960 utáni időszakban az ingások hasonlóak, noha a júniusi csökkenés a hótakaró kiterjedésében sokkal gyorsabb, mint a késő tavaszi.

Még izgalmasabb kép tárul elénk a tengeri jégtakaró kiterjedésével kapcsolatban (3.d és e ábra). Az évi átlagos jégtakaró alakulásában az északi félgömbön látható jégtakaró-csökkenés, ami

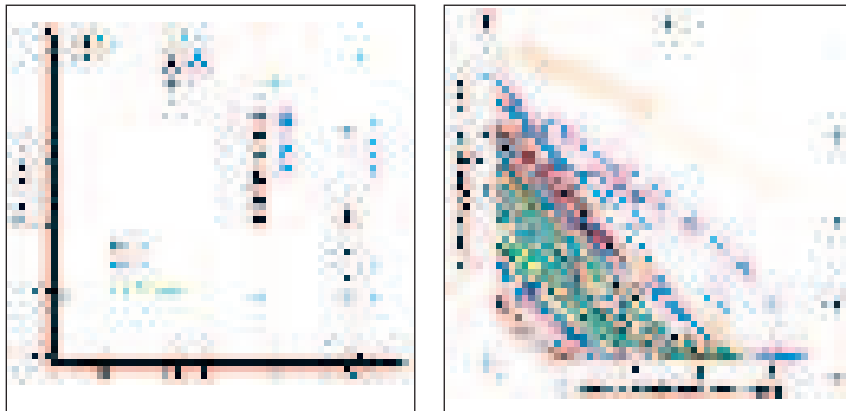
azért itt is egy stagnáló évtizeddel zárul, nem meglepő, mert összecseng a hőmérséklet alakulásával. Ugyanakkor, a déli félteke Antarktisz körüli tengeri jégtakarója a teljes időszakban növekvő tendenciát mutat!

E tény magyarázatát az IPCC (2013) sem tudta megadni. Ezzel kapcsolatban megjegyezzük (de mert nem műholdas megfigyeléseken alapszik, ezért nem részletezzük), hogy az IPCC (2013) 3.3 ábrája szerint az óceán a déli féltekén 4000–6000 méter mélységben is intenzíven melegszik, elvonva ezzel az üvegházgázok dúsulásából eredő hőtöbblet jelentős részét a levegőtől és valószínűleg a tengeri jégtől is.

A klímamodellek igazolása

A jelenlegi éghajlat szimulációja

Az éghajlati rendszer egyike a legbonyolultabb, nem lineáris rendszereknek, ezért fontos a klímamodellek tesztelése. Ennek első kérdése annak megállapítása, hogy a jelenlegi feltételek mellett szimulált éghajlati mezők megfelelnek-e a valóságnak. A 4.a ábra megmutatja, hogy javult-e a valóságos és a modellekben szimulált me-



4. ábra. (a) A modellekben szimulált és megfigyelésekből rekonstruált éghajlati mezők közötti korreláció: 1980-1999 évi átlagok. Az ábrán az IPCC (2007: CMIP3) és IPCC (2013: CMIP5) modellek egyenként megállapított együtharmonosítható (vékony vonal), ezek átlaga (vastag vonal) és a mediánja* (kör) látható, mégpedig rendre a felszíni léghőmérséklet (TAS), a hosszuhullámú kisugárzás (RLUT), a csapadék (PR) és a felhőzet rövidhullámú sugárzási hatása (SW CRE) esetében (IPCC, 2013: Fig. 9.6)

(b) Az északi félteke tengeri jégtakarójának jelenlegi (szeptemberi) kiterjedése és a globális melegedés függvényében ábrázolt területvesztése az 1986-2005 időszak átlagához képest. A műholdokról megállapított tényleges kiterjedés és annak ± 2 szórásnyi sávja az ábra bal oldalán fekete színnel látható. A vízszintes vonal a közel jégmentes tengert jelzi (IPCC, 2013: Fig. 12.30 részlete)

*Mediánon azt az értéket értjük, amelynél kisebb és nagyobb érték is 50-50 % gyakorisággal fordul elő

zók közötti korreláció a legújabb Jelentés (IPCC, 2013: CMIP5) modelljeiben az előző IPCC (2007: CMIP3) generációhoz képest. (A CMIP a Klímamodelleket Összehasonlító Projekt rövidítése. Ennek ötödik fázisára a 2013-as, míg a harmadikra az előző IPCC Jelentés támaszkodik.)

Ha a korreláció pontosan 1 lenne, akkor a valóság és a modell-szimuláció között egyszerű lineáris ($y=a+bx$ alakú) függvénnyel pontosan meg lehetne adni az átmenetet. Minél kisebb a korreláció, annál bizonytalanabbul tudjuk a szimulált mezőkből rekonstruálni a valóságot. Mivel a két különböző eljárással megfigyelt mezők közötti korreláció értéke sem pontosan 1 (zöld pontok), nem biztos, hogy a kisebb korrelációkat kizárólag a modellek pontatlansága okozza.

Rátérve az egyes változók szimulációjára, elégedettek lehetünk felszínhőmérséklet (TAS) és a hosszuhullámú kisugárzás (RLUT) becsülésével, amiket már az előző Jelentés modelljei is jól szimuláltak. Ezért a javulás a két jelentés között eltelt hat évben már nem volt jelentős. Javításra szorulna a csapadék (PR) szimulált eloszlásának hasonlósága a valósággal, amin az utóbbi korreláció is csak kevéssel 0,8 fölé tudott javulni. Kedvező viszont, hogy a korrelációs együtharmonosítható közötti szóródása csökkent. Legkevésbé a felhőzet rövidhullámú sugárzási hatásának (SW CRE) a szimulációja sikeres, mind az ala-

csony pontosság (0,7-es korreláció), mind a javulás hiánya miatt.

A műholdak a második (RLUT) és negyedik (SW CRE) változó becsülésénél jutottak szerephez.

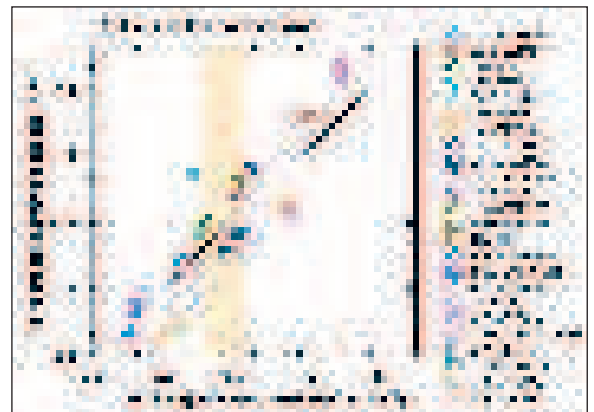
A 4.b ábrán a tengeri jégtakaró kiterjedését vetjük össze a valósággal. Megfigyelhető, hogy a nulla változáshoz tartozó modellezett és megfigyelt értékek nem igazán egyeznek. A szeptemberi, minimális kiterjedés idején a modellek zömében a valóságnál kisebb területet takar tengeri jég. Meglehetősen nagy (bő ötszörös!) a különböző modellekben szimulált tengeri jégtakaró kiterjedése közötti eltérés is. Emiatt nem meglepő, hogy a közel jégmentes állapotot jelképező vízszintes vonalat is nagyon eltérő mértékű feltételezett melegedésnél lépik át az egyes modellek.

Visszacsatolások, az éghajlat érzékenysége
Az éghajlat külső tényezőkkel szembeni érzékenységét befolyásolják az éghajlati visszacsatolások. Ez a fogalom azt jelen-

ti, hogy ha (bármilyen okból) megindul az éghajlat változása, akkor ez az éghajlati rendszer megannyi részfolyamatát is módosítja, amelyek egy része visszahat az éghajlatra. Ha ez a visszahatás erősíti a klímaváltozást, akkor pozitív, ellenkező esetben negatív visszacsatolásról beszélünk.

Az alcím másik fogalma az éghajlat érzékenysége, azaz a külső tényezők adott változása miatt fellépő éghajlatváltozás. Ezt az érzékenységet legegyszerűbben a $\Delta Q = -\lambda \Delta T$ egyenletben szereplő λ együtharmonosíthatóval jellemezhetjük, amely meghatározza, hogy a légkör külső határán bekövetkező ΔQ változás mekkora ΔT hőmérsékletváltozást okoz a felszín közelében, bejárva, amíg az éghajlati rendszer felveszi az új egyensúlyi állapotát.

A legfontosabb negatív (a változásokat mérséklő hatású) visszacsatolás maga a hosszuhullámú kisugárzás (P), melynek lényege, hogy minél magasabb a hőmérséklet, annál több a rendszer kisugárzása, ami csökkenti a meleget. Ha csak ez a visszacsatolás működne, akkor a szén-dioxid duplázódás hatására a felszínen a levegő hőmérséklete csupán 1,2 °C-kal emelkedne. A többi visszacsatolás együttes hatására azonban e változás a modellek közötti nagy szórással $3 \pm 1,5$ °C.



5. ábra. A hókiterjedés hőmérséklettől való függésének együtharmonosíthatója tavasszal a klímamodellek szimulációja során (y-tengely), illetve az éves menet alapján (x-tengely). Az eredmények 17 CMIP3 (kék színnel) és 24 CMIP5 modell számításain alapulnak. A vertikális sáv a műholdokról megfigyelt évszakos ingásból számított területváltozás és ennek bizonytalansága (IPCC, 2013: Fig. 9.45 részlete)

Az éghajlat érzékenységét fokozó legfontosabb pozitív visszacsatolások a légköri vízgőzzel, a felhőzettel és a krioszféra fényvisszaverő képességével kapcsolatosak, míg az egyetlen további a változást fékező, negatív visszacsatolás a légkör függőleges hőmérsékleti gradiensevel kapcsolatos.

A fentiek közül a legismertebb a hóalbedő visszacsatolás. Amikor melegszik a rendszer, akkor a hó és jég olvadásával felszabaduló területeken a napsugárzásból visszavert hányad (ez az albedó) a fehér felszín 70–90%-os értéke helyett 10–20% körüli értékekre csökken, ami tovább erősíti a változást.

Ezt a visszacsatolást illusztrálja az 5. ábra, amiben műholdas információ is szerepel. A függőleges sárga sáv ugyanis azt mutatja, hogy a hótakaró tavaszi kiterje-

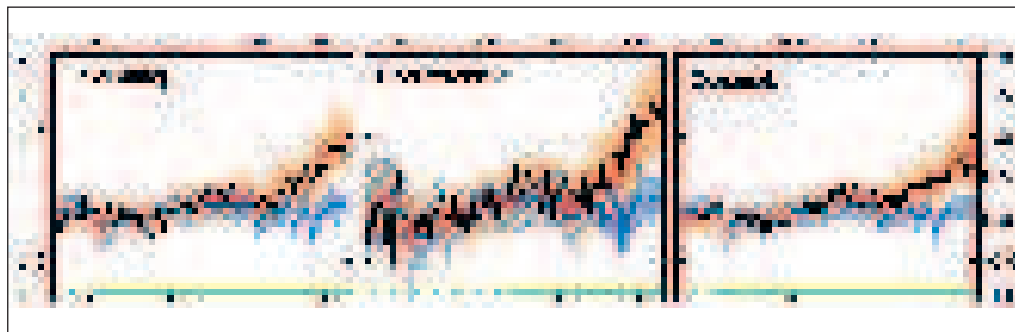
ben mérjük, vagyis e mutató megfigyelésében a műholdak nem jutnak szerephez.

A 6. ábra a felszíni (2 méteres magasságban mért) hőmérséklet alakulását mutatja be földi átlagban, valamint külön-külön a kontinensek és az óceánok fölött. A megfigyelt érték mindegyik részben a fekete, kisebb-nagyobb ugrásokkal tarkított vonal. A sárga sáv a legutóbbi és a korábbi klímamodellek 90%-os bizonytalansági sávja (ezen kívül 5–5% esik), a piros vonal pedig ezek mediánja. Mindkettő úgy, hogy

ezeket a felszín-bázisú információkkal és a fizika törvényeit matematikai egyenletekbe öntő, majd azt nagyszámítógépekkel megoldó modellekkel együtt érdemes használni.

Az éghajlat alakulásáról és a modellek szimulációs képességéről tett számos pozitív megállapítás mellett meg kellett jegyeznünk, hogy nem tudjuk, miért stagnált egy bő évtizedig a levegő hőmérséklete, illetve miért nő az Antarktisz körüli tengeri jég, miközben az éghajlati rendszer egyre több energiát tud magában tartani az üvegházhatású gázok erősödése folytán. (Nem mutatuk, de a teljes éghajlati rendszer hőtartalmában ez hiánytalanul megjelenik, amint ez ellenőrizhető az IPCC, 2013: Box 3.1, Fig. 1 ábráján.)

E tény akkor is magyarázatra vár, ha közben a 2014-es és a 2015-ös évek felszíni hőmérséklete újra rekordokat döntött (NOAA, 2015), vagyis a melegedés egy bő évtizednyi szünet után alighanem ismét folytatódik. ↩



6. ábra. A felszíni léghőmérséklet alakulása a CMIP3 és a CMIP5 klímamodellek összes futása illetve a megfigyelések alapján. A fekete vonal a megfigyelt érték, a sárga sáv az antropogén és természetes tényezők hatására szimulált futások és azok mediánja. Kék sávval és vonallal a csak természetes tényezők (vulkánok, naptevékenység) hatása alatt szimulált futások láthatók. A sávok minden esetben az összes futás 90%-os konfidencia sávjai, amelyekben kívül csak az eredmények 5–5%-a esik (IPCC, 2013: Fig. 10.7)

dése milyen együttműködéssel jellemezhető, lineáris kapcsolatot mutat az évi ingás során az egyes hónapokban felvett északi félgömbi hőmérséklettel.

Ha ezt a sávot összevetjük a (mindkét generációt képviselő) modelleket jellemző pontokkal, amelyek vízszintes koordinátáját ugyanez az évszakos változás határozza meg, míg a függőleges koordináta az a változás a hótakaróban, ami tavasszal a klímaváltozási kísérletben 1 °C változás esetén keletkezik. Noha a modellek egymás közötti szórása meglehetősen nagy, megnyugtató, hogy az évszakos ciklus szerinti szimulált értékek szimmetrikusan szóródnak a megfigyelt sáv körül. Mivel a modellekben a kétféle módon számított területváltozások egyértelmű statisztikai kapcsolatot mutat egymással, bizhatunk benne, hogy a klímaváltozás során fellépő területváltozások modellbeli átlaga sem torzított.

Az éghajlatváltozás szimulációja

Végül, a modellek tesztelésének a harmadik iránya arra ad választ, hogy jól szimulálták-e a közelmúlt felmelegedési tendenciáit. Sok mutató ellenőrzésére volna lehetőség, de terjedelmi okokból a legjobban érthető mutatóra, a felszíni léghőmérsékletre szorítkozunk. Tesszük ezt annak ellenére, hogy ezt a változót a felszín közelé-

a modellekben minden ismert természetes és antropogén tényezőt figyelembe vettek. Azokból a futásokból, amelyeknél elhagyták az antropogén tényezőket, a kék sávhoz, illetve vonalhoz jutottak.

Ebből láthatóan a XX. század második felében tapasztalt melegedés nem következhetett volna be az antropogén hatások nélkül. Legalább 1960-tól a szimuláció mindkét bontásban és globális átlagban is jól visszaadta a felszíni léghőmérséklet megfigyelt változásait. A XXI. század elején viszont elmaradás mutatkozik a megfigyelt adatokban a szimulációhoz képest. Ebben az időszakban a megfigyelt léghőmérséklet stagnált, miközben a modellek tanúsága szerint tovább kellett volna melegednie. Az elmaradás az óceánok fölött a legnagyobb, míg a kontinensek fölötti léghőmérséklet nagyjából az elvárás szerint alakult. Ennek a „globális melegedési hiátus”-nak a magyarázatával még adós a tudomány.

Következtetés

Írásunkban rámutattunk, hogy a műholdas megfigyelések sok értékes ismerettel járulnak hozzá az éghajlatváltozás megértéséhez és előrebecsléséhez. Bár most a műholdas lehetőségekre koncentráltunk, több helyen is jeleztük, hogy

Irodalom

- IPCC WGI (2007): Climate Change (2007): The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007 (Solomon, S., et al. eds.) Cambridge University Press, Cambridge UK & New York NY, USA. (http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html Letölthető 2015. október 24-én.)
- IPCC WGI (2013): Climate Change 2013: *The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., et al. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp. (<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/> . Letölthető 2015. október 24-én.)
- Kerényi J. és Mika J. (2014): Az időjárás és az éghajlat vizsgálata EUMETSAT műholdakkal. *Természet Világa* 2014 *Európával a Világűrben* Különszám, 64-68
- Mika J. (2008): Műholdas megfigyelések a klímaváltozási ismeretek rendszerében. *Híradástechnika*, LXIII. évf. 10. sz., 44-49
- NOAA (2015): Global Summary Information - September 2015. (<http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/summary-info/global/201509>. Letölthető 2015. október 24-én.)