

JÁNOSI IMRE

Globális éghajlatváltozás és természeti katasztrófák*

Rendkívüli érdeklődés övezte ez év február 2-án az ENSZ éghajlatváltozással foglalkozó szakmai szervezetének (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC [1]) párizsi sajtóértekezletét, ahol ismertették legújabb átfogó jelentésük első kötetének legfontosabb megállapításait. Ez a kormányközi szervezet 1988-ban alakult, három fő munkacsoportja sok ezernyi szakértő munkájára alapozva igyekszik megtalálni a klímakutatás szerteágazó eredményeinek „legkisebb közös többszörösét”, azaz állást foglalni a döntő kérdésekben. Utolsó, 2001-es jelentésük (melynek teljes szövege hozzáférhető a világhálón [2]) sem hagyott sok kétséget a globális éghajlatváltozás tényét illetően. Az azóta eltelt időben született új kutatási eredmények alapján a korábbi állításokat finomították, a számértékeket pontosították, illetve az előrejelzések javítására összpontosítottak.

Az IPCC következtetéseinek megbízhatóságát rendkívüli mértékben támogatja, hogy a korábban megfogalmazott jóslatok túlnyomó része számszerűen bebizonyosodott: az utolsó évtizedben a globális átlaghőmérséklet 0,2 °C-kal emelkedett, a műszeres mérések kezdete (1850) óta följegyzett tíz legmelegebb év mindegyike 1990 után következett be, az északi félteke jégtakarója rohamosan zsugorodik, a globális tengerszint folyamatosan emelkedik. Az emberi tevékenység klímamódosító hatásának valószínűségét a legfrissebb jelentés 90 százalék fölötti értékre becsüli.

A előbbiekhöz hasonló megállapítások már magukban is bőséges alapot nyújtanak a népszerű „ismeretterjesztő” irodalomban burjánzó katasztrófa-előrejelzésekhez. Ezek szerint az elviselhetetlenül forróvá váló és kiszáradó, az Egyenlítőhöz közeli területekről, valamint az elárasztott tengerparti övezetektől északra, illetve délre menekülő tömegek életét a pusztító esőzések és áradások miatt állandósuló éhezés és elképzelhetetlen erejű szélviharok keserítik majd meg, méghozzá a következő néhány évtizeden belül. Mindezt alátámasztani lát-

szik, hogy szinte nincs olyan esti híradó, amely ne számolna be egy hurrikán, árvíz vagy földcsuszamlás szörnyűségeiről, már ha jut hely az aktuális terrormerénylet vagy közlekedési katasztrófa képei mellett.

Az utolsó néhány évben az éghajlatváltozással kapcsolatos „szkeptikus” fórumokon egyre kevésbé a globális melegedés tényét támadják (ez nehéz is lenne), hanem inkább a fenyegető következményekről, negatív gazdasági hatásokról szóló jóslatokat kérdőjelezzik meg. Ehhez persze minden alap adott, ugyanis ki láthatná előre pontosan akár a közeli jövőt is? Az IPCC jelentései maguk is hangsúlyozzák, hogy egy szűkebb földrajzi régióra (pl. a Kárpát medencére) vonatkozó előrejelzések megbízhatósága sokkal alacsonyabb, mint ami a globális átlagértékeket illeti. Ez a tény nem az alkalmazott módszerek hiányosságából adódik, hanem az éghajlat komplexitásának következménye. Könnyű azt kijelenteni, hogy a Napból a Földre érkező teljes elnyelt sugárzási energiának pontosan meg kell egyeznie a Földről az űrbe kisugárzott teljes energiámmennyiséggel (ezt egyébként pontos mé-

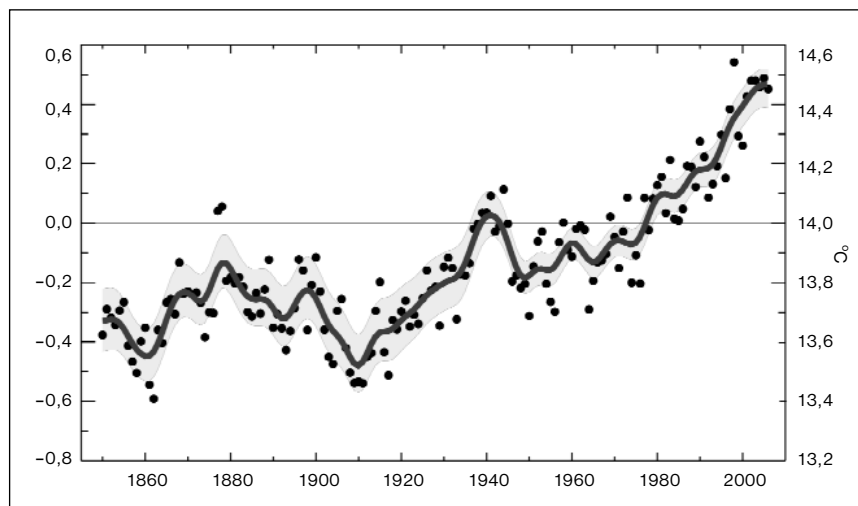
rések is bizonyítják). Nyilvánvaló, hogy pusztán ebből a globális egyensúlyi feltételből vajmi kevés következtetés vonható le például a Balaton következő nyáron várható vízszintjére.

Mielőtt eldöntenénk, vajon a radikális zöldek vagy megrögzött szkeptikusok érvrendszere a meggyőzőbb számunkra, célszerű a klímaváltozással kapcsolatos főbb kijelentéseket kissé körüljárni. Mit is jelent ez a következő száz évre várt **2-4,5 °C** os globális hőmérséklet-emelkedés? Mi köze ennek a pusztító időjárási katasztrófához? Mikor kell elköltözni a tengerpartok mellől? Mennyiben felelős az emberiség az egészért? E rövid áttekintés csak néhány szempontot villanthat fel, a részletek iránt érdeklődők nem kerülhetik el az irodalmi bűvárcodást.

Éghajlatváltozások rövidebb-hosszabb időskálán

A globális fölmelegedés tényét általában az **1. ábrán** láthatóhoz hasonló grafikonokkal szokták illusztrálni, melynek ada-

1. ábra. A globális átlaghőmérséklet alakulása a Föld felszínén a műszeres mérések kezdete óta. A jobb oldali skála az abszolút értéket, a bal oldali az 1961–1990 közötti átlagértéktől való eltérést mutatja. A fekete pontok az egyes évekre vonatkoznak, a folytonos vonal ezek simított átlaga, a szürke sáv pedig a mérési bizonytalanság mértékét szemlélteti



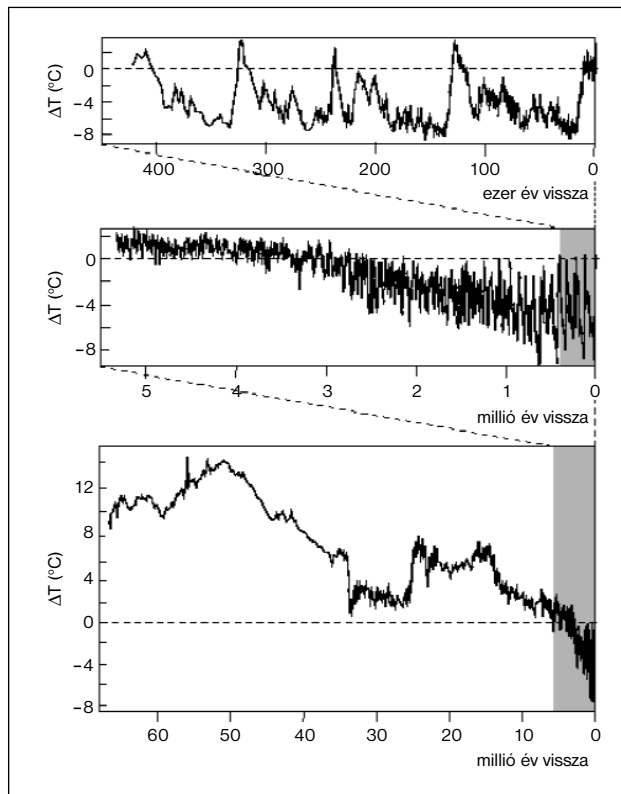
Ez az írás az ELTE TTK-n „Az atomoktól a csillagokig” címmel szervezett ismeretterjesztő sorozat (<http://www.atomcsill.elte.hu>) nyitó előadásának aktualizált kivonata.

tai többszörös megerősítést nyertek. A XX. század közepétől kezdve a Föld teljes felszínére vonatkozó átlagos hőmérséklet egyértelműen emelkedő tendenciát mutat. A továbbiakhoz nem árt rögzíteni, hogy a relatív hőmérsékleti skálát (1. ábra, bal oldal) az 1961 és 1990 közötti harminc év referencia átlagához képest definiálták.

A következő évtizedekre vonatkozó előrejelzéseket nem a grafikon egyszerű extrapolációjával gyártják, hanem globálisan csatolt atmoszféra-óceán numerikus modellek segítségével becslük. Ezek szerint (19 különböző szuperszámítógépes modell alapján) a 2100 körül várható átlagos hőmérséklet kb. 3 °C-kal is magasabb lehet, mint az említett referenciaidőszakban. Sok ez vagy kevés? Erről végtelen hosszan lehetne vitatkozni, egy azonban bizonyos: a 17 °C körüli globális átlaghőmérséklet egyáltalán nem példátlan, geológiai időskálákon ennél sokkal magasabb és alacsonyabb értékek is bőven előfordultak már.

A Föld története során legalább négy olyan nagyobb globális lehűlés volt, amikor jégkorszakok uralkodtak, pl. a 800–600 millió évvel ezelőtti időszakban (mikor az életnek még csak a csírái léteztek és azok is a tengerek mélyén) a tenger felszíne egészen az egyenlítői területekig befagyott. A globális lehűlések között millió években át az egész Földön nagyon meleg, szinte mindenütt trópusi éghajlat uralkodott. Az utolsó globális lehűlés közel 40 millió éve kezdődött, az ezt megelőző időszakban a jelenleginél 10–12 °C-kal magasabb átlagértékek voltak a jellemzők (2. ábra, alul). Ekkor sem a Déli-, sem pedig az Északi-sarkon nem volt jégtakaró! A globális hűlés kb. 4–5 millió évvel ezelőtre pontosan olyan értékeket eredményezett, amelyeket 2100 körül várhatunk (2. ábra, középen). A hőmérséklet csökkenése ezt követően is folytatódott, és 3 millió évvel ezelőtt egy erősen ingadozó időszak kezdődött. Ennek során kezdetben közel 40 ezer éves, utóbb 100–110 ezer éves periódusidővel egymást követték a lassú lehűléseket hirtelen megszűnő rövidebb „meleg” időszakok (2. ábra, felül). Az utolsó jégkorszak, amikor a globális átlaghőmérséklet 8 °C-kal volt alacsonyabb a jelenleginél, nagyjából 10 ezer évvel ezelőtt ért véget.

Az utolsó néhány ezer évben a klíma állapota nagyjából stabilnak mondható. A régmúlt idők éghajlati viszonyaival



2. ábra. A Föld felszínének globális hőmérséklete millió éves időskálákon. Alul az utolsó 65 millió év rekonstruált adatai [3], középen az utolsó 5,5 millió év kinagyítva [4], legfeljebb a Vosztok jégfúrás rekonstruált hőmérsékleti értékei [5] az utolsó 420 ezer évre. Ez utóbbin jól látszik az utolsó négy jelentősebb jégkorszak. A vízszintes szaggatott vonal mindegyik ábrán az 1961–1990 közti átlagértéket jelöli

egyébként a mára szinte önálló tudományággá fejlődött paleoklimatológia foglalkozik, eszköztára igen sokrétű. A fák évgyűrűi, a korallak kémiai összetétele, a tavak és tengerek fenekén lerakódó üledék, vagy a jégtakaró rétegeiben csapdába esett zárványok mind rengeteg értékes információt nyújtanak a sok-sok ezer vagy millió évvel ezelőtti viszonyokról. Természetesen minél rövidebb időre kell visszatekinteni, annál részletesebb adatok nyerhetők. Innen tudjuk például, hogy a jelenleg is tartó, viszonylag stabil meleg időszak jól detektálható regionális ingadozásokkal járt együtt. Európa területén pl. a XIV. század elejétől a XIX. század közepéig a referenciaidőszakhoz képest közel 0,5–1 °C-kal alacsonyabb éves átlagértékeket rekonstruáltak. Ez az enyhe negatív kilengés a többi kontinensen nem tűnik kimutathatónak. Ennek ellenére a történelmi források gazdagon dokumentálják, hogy a változás csekély volta ellenére Grönland lakhatatlanná (túl hideggé) vált (a vikingek eltűntek), Nagy-Britannia déli részéről „kifagyott” a korábban virágzó szőlőművelés, az Alpok gleccserei növekedni kezdtek, és a földrész nyugati felét általában is éhínsé-

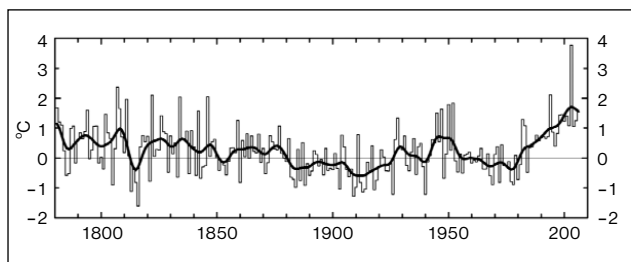
gek sújtották, mert a gabonafélék termése nem tudott beérni. Néha ezt az időszakot „kis jégkorszak” néven emlegetik (ellentétbe állítva a X–XIII. század közötti „középkori optimum” szakaszával), bár ezt az éles különbségtételt többen vitatják.

Jelenlegi ismereteink nem teszik lehetővé, hogy a földi éghajlat változásainak okait és mechanizmusait magyarázni tudjuk. Különösen igaz ez a sokmillió éves folyamatokra. Van elméletek, melyek a Nap körüli keringés anomáliáit hozzák összefüggésbe az utolsó 7–8 jégkorszak bekövetkeztével, de a teljes kép ettől még messze nem áll össze. Valójában az ugrásszerű változások megértése a legnehezebb, például a leghalványabb elképzelésünk sincs arról, hogy mi történt 34 millió évvel ezelőtt, mikor a Déli-sarkvidék jége hirtelen növekedésnek indult, illetve miért olvadt el majdnem teljesen 10 millió évvel később (2. ábra, alul). Egyébként a szokásos egyszerű válasz az összes ilyen kérdésre az, hogy „valami történt a Napban”, de persze ez sokakat nem elégít ki.

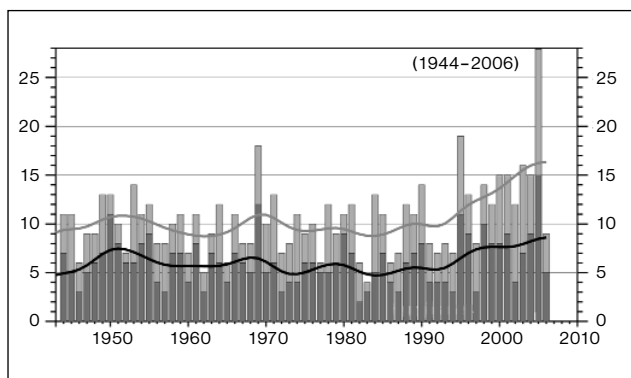
Az említettek alapján lehetséges összegzés eléggé zavarba ejtő. Tudjuk, hogy a földi klíma jelentős kilengéseket mutatott, 8–10 °C-kal hidegebb és 12–14 °C-kal melegebb globális átlaghőmérsékletek is bőven előfordultak, de ennek magyarázatát nem igazán ismerjük. Ha az 1. ábra adatait, illetve a numerikus számítások eredményeit nézzük, rövid távon bizonyosan melegebbé kell számolnunk. Ha azonban a 2. ábra felső diagramját vesszük alapul, a periodicitás természetes folytatásaként éppen itt az ideje a következő lehűlésnek. Egy emberközpontú megközelítés is lehetséges. Fajunk 5,5–6 millió évvel ezelőtt jelent meg. A 2. ábra középső grafikonján pont erre az időszakra ábrázolt hőmérsékletek jelentős klimatikus kilengéseket mutatnak, az emberiség azonban ezeket mind túlélte, sőt meghódította a bolygót. Viszont a „kis jégkorszak” tanulsága azt mutatja, hogy globális skálán alig kimutatható változások is járhatnak drasztikus következményekkel.

Szélsőséges időjárási események

Minthogy a globális átlaghőmérséklet viszonylag enyhe emelkedése önmagában nem tűnik fenyegetőnek, sokkal nagyobb



3. ábra. A nyári (június–július–augusztus) középhőmérsékletek alakulása Közép-Európa területén az 1961–1990 közti időszakhoz képest [1]



4. ábra. Jelentős trópusi viharok (világosszürke), ezen belül a hurrikánok (sötétszürke) évenkénti száma az Atlanti-óceán északi medencéjében [1]

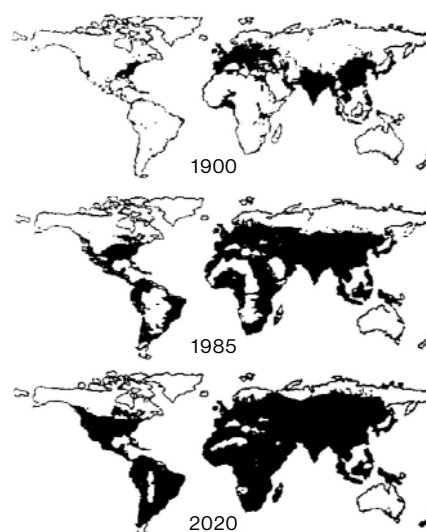
figyelem irányul a szélsőséges időjárási események várható gyakoriságára. Sokan emlékezünk még a 2003. év nyarán bekövetkezett európai hőhullámra, aminek majdnem húszezer halálos áldozatot tulajdonítanak. Valóban, a 3. ábra adatai alátámasztani látszanak, és a globális fölmelegedés „természetes” velejárójának tűnik, hogy nyaranta sokkal erősebb és hosszabban tartó kánikulákra kell számítanunk.

Ehhez hasonló figyelem övezi a pusztító viharokat, amelyek földrészünket sze-

4. ábra látszólagos emelkedő tendenciájának jelentéséről. A fizikai modellek ugyanis arra utalnak, hogy egy növekvő átlagos tengerszint emelkedése (ezen belül elsősorban a szélnyírás) fokozódása gátolja a „hurrikánmotor” fölépülését.

Hosszan foglalkozhatnánk még további extrém eseményekkel, mint amilyenek például az elhúzódó szárazságok, pusztító

rendsére kevésbé sújtják, mint pl. Észak-Amerikát vagy Délkelet-Ázsiát. A nyári hőhullámokkal ellentétben a viharok gyakoriságával kapcsolatban sokkal több a nyitott kérdés. Először is, a 4. ábrán láthatóhoz hasonló statisztikák megbízhatósága messze nem ugyanaz, mint az egyszerű hőmérsékleti adatoké. Az igaz ugyan, hogy a repülés elterjedése maga után vonta az észlelések ugrásszerű javulását, de pl. a viharok erősségének becslése a műholdas távérzékelés előtti időben meglehetősen nagy hibákkal volt terhelt. Jelenleg a szakirodalomban még erősen megoszlanak a vélemények a globális fölmelegedés és pl. a hurrikán gyakoriság összefüggéseiről, azaz a

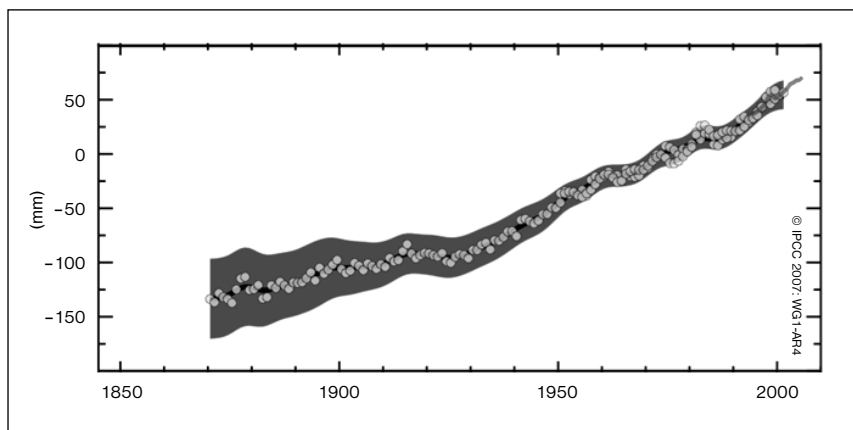


5. ábra. A Föld népességének gyarapodása. 1900: 1,65 milliárd 1985: 4,83 milliárd 2020 (becslés): kb. 8 milliárd. Egy fekete pont egy-millió népegyesért [6]

árvizek, korai fagyok vagy jégesők. Ehelyett inkább egy olyan tényezőt szeretnénk megemlíteni, ami gyakran elkerüli figyelmünket, ha a látszólag egyre gyakoribb természeti katasztrófákról hallunk. Ez a tényező az emberiség töretlen gyarapodása, mind létszámát, mind anyagi javait tekintve.

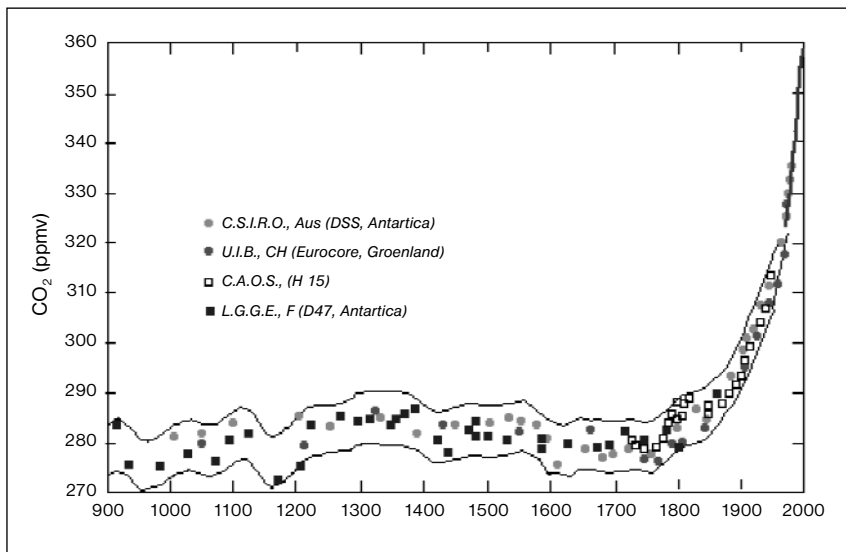
Az 5. ábrán látható, hogy a népesség-növekedés természetes velejárójaként egyre nagyobb, korábban néptelen terület válik sűrűn lakottá. Ennek nyilvánvaló következménye, hogy pl. a viharok száma folyamatosan növekszik, ami nem jelenti feltétlenül a viharok számának emelkedését. A jólét növekedése pedig azt jelenti, hogy drága épületek, autósztrádák, hidak és távvezetékek rongálódnak meg növekvő számban olyan területeken, ahol korábban legföljebb csak elakadt az ökrös szekér a sárban.

6. ábra. A globális átlagos tengerszint emelkedése az 1961–1990 közti átlaghoz képest [1]



Vegyünk-e tengerparti nyaralót?

Mindenképpen, ha megtehetjük. Első látásra ugyan elég ijesztőnek tűnhet az IPCC jelentésében található 6. ábra, de azért nézzük meg alaposan a tengelyek besztását is. Az elmúlt évszázadban közel 15–20 cm-t emelkedett a globális óceán szintje, igaz, hogy egyre gyorsuló ütemben. Hasonlóan az átlagos hőmérséklet-hez, földtörténeti időskálákon az ingadozás ehhez képest óriási: 3 millió évvel ezelőtt a tengerszint 30–35 méterrel magasabb, míg a 20 ezer évvel ezelőtti jéges minimum idején kb. 120 méterrel alacsonyabb volt a jelenleginél.



7. ábra. Négy helyen rekonstruált CO₂-koncentráció az utolsó 1100 évben [10]. A ppmv egység jelentése: a térfogat egy milliommód része (parts per million). A 2007. januári mért érték 383 ppmv, rá sem férne az ábrázolt tengelyre

Ami a további emelkedést illeti, a bizonytalanság eléggé nagy. Ennek oka, bármilyen furcsának tűnik is, a fizikai mechanizmusok hiányos ismerete. A tengeren úszó jég olvadása első közelítésben nem okoz szintemelkedést, éppúgy, ahogy a színültig töltött koktélos pohár sem csordul ki, ha akár az összes jégkocka felolvad is. A vízszint emelkedéséért a szárazföldröket borító jégtakaró olvadása, és a hőmérséklet-emelkedés okozta térfogati tágulás a felelős. Mindezt számszerűsíteni azonban igen nehéz. Az óceánok gigantikus tömege és hőkapacitása miatt a tipikus „válaszidő” több száz, akár több ezer éves nagyságrendű, emellett egy sor visszacsatolási mechanizmus sem teljesen ismert. Az IPCC igen óvatosan a következő száz évre 21–70 cm közé becsüli, míg egyéb adatanalízisek inkább az 55–125 cm tartományon belül várják a globális tengerszint növekedését [7].

Mi lehet a borúlátóbb, 1 méter körülire előre jelzett emelkedés következménye? Ezt megint nehéz pontosan megmondani. Annyi bizonyos, hogy a tengerpartok mindig is a legkedveltebb emberi lakhelyek voltak, jelenleg a Föld népességének 34 százaléka 100 méternél alacsonyabb, főleg vízparti területeken él [8]. Elsősorban őket érintheti a tengerszint emelkedése, emberi beavatkozás nélkül jelentős területek kerülhetnek víz alá. Az 1 méternél is alacsonyabban fekvő parti területek össz nagysága közel 2 millió km², nem is beszélve Hollandia, Németország, Anglia vagy Olaszország sűrűn lakott régióiról, melyek már ma is a tengerszint alatt terülnék el. Ugyanakkor az időskálát alapul véve, nem tűnik lehetetlennek évente 1 cm-t

emelni a gátakon, parti védműveken. Vigyázat, ez a becslés hibás! A védelmet ugyanis nem az átlagos vízszintre kell tervezni, hanem a szélsőértékekre, amit pl. a dagályra ráülő viharhullámok jelentenek. Ezek nagysága pedig bizonyosan erősebben nő, mint az átlagos vízszintté, legalábbis az eddigi megfigyelések erre utalnak [9]. Visszatérve a nyitó kérdésre: vegyük csak meg azt a nyaralót, de csak akkor, ha mellette egy jó biztosításra is futja.

Az emberi tevékenység hatása a földi éghajlatra

Az IPCC-jelentés rövid előzetese a következő állítást fogalmazza meg: a XX. század második felétől tapasztalható légköri és óceáni hőmérséklet emelkedése a jégtömeg zsugorodásával együtt elhanyagolható valószínűséggel tulajdonítható kizárólag természetes tényezőknek az emberi hozzájárulás figyelembevétele nélkül. Ez elsősorban az „üvegházhatású gázok”, ezen belül a szén-dioxid (CO₂) tömeges kibocsátásának következménye. Valóban, a mérések egyértelműen mutatják, hogy az utolsó közel négyszázezer évben soha nem volt akkora a légköri CO₂-koncentráció, mint manapság, és az ugrásszerű változás az ipari forradalom kiteljesedésével esik egy időbe (7. ábra). A numerikus előrejelzések arra utalnak, hogy a jelenlegi koncentráció befagyasztása sem állítaná meg az éghajlat további melegedését vagy száz évig, de a kibocsátás csökkenésének semmi jele, a tendencia éppen fordított.

Az üvegházgázok (a szén-dioxid mellett elsősorban a metán és a nitrogén-oxi-

dok) azzal emelik a légkör hőmérsékletét, hogy az infravörös sugárzást elnyelik, tárolják, és részben visszasugározzák a levegőbe. Mindemellett a legfontosabb üvegházgáz a vízpára, amely lényegesen nagyobb koncentrációjú minden szennyezőnél, viszont eloszlása térben rendkívül inhomogén, és időben erősen ingadozik. Egyéb szennyezőanyagok, mint pl. a füstben lévő aeroszolrészecskék és a por ezzel ellentétes hatásúak, hűtik a légkört. Legalábbis jelenlegi ismereteink szerint, amiben azért sok még a hiányosság. Csak tavaly derült ki például, hogy a zöld növényzet természetes életciklusa során legalább akkora mértékben bocsát metán a levegőbe, mint az emberi tevékenység [11]. A szén földi körforgása is föltöbb bonyolult folyamat, bizonyos lépéseket még nem teljesen értünk. A Vostok jégfúrás eredménye azt mutatja, hogy az átlagos hőmérséklet (2. ábra, felül) és a légköri CO₂-koncentráció nagyon együtt mozgott az utolsó négy jégkorszak során, de még azt sem tudjuk, hogy melyik volt az ok és melyik az okozat.

A hasonló kérdőjelek ellenére az IPCC-jelentés határozott állásfoglalása egyértelmű: lassítani kellene a környezeti szennyezését. Akár sikertörténetként is említhetjük az ozonréteg kilyukadását okozó, porlasztópalackokban használt nyomógázok betiltását, melynek már most látható pozitív hatásaként a sarkok fölötti magaslégtörő ózon regenerálódni tűnik. Az üvegházgázokkal nehezebb lesz a helyzet, mert az egész emberi technológia egyelőre a fosszilis energiahordozók eltüzelésén alapul. Arról nem is beszélve, hogy a karakterisztikus válaszidő is sokkal hosszabb, miáltal csak jó néhány generációval később tapasztalhatnánk az utódaink némi javulást. De ennek is csekély a valószínűsége, mert jelszavakon kívül egyelőre nem látszik semmi jele a konkrét lépéseknek.

IRODALOM

- [1] <http://www.ipcc.ch>
- [2] http://www.grida.no/climate/ipcc_tar/index.htm
- [3] J. Zachos, et al. (2001) Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. *Science* 292, 686–693
- [4] L. E. Lisiecki, M. E. Raymo (2005) A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic $\delta^{18}\text{O}$ records. *Paleoceanography* 20, PA1003
- [5] J. R. Petit, et al. (1999) Climate and atmospheric history of the Past 420,000 years from the Vostok ice core, Antarctica. *Nature* 399, 429–436
- [6] J. H. Tanton (1994) End of the Migration Epoch? *The Social Contract* 4 (3), 162–173
- [7] S. Rahmstorf (2007) A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science* 315, 368–370
- [8] J. E. Cohen, Ch. Small (1998) Hypsographic demography: The distribution of human population by altitude. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 95, 14009–14014
- [9] http://www.wbgu.de/wbgu_sn2006_en.pdf
- [10] <http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/co2/vostok.htm>
- [11] F. Keppler et al. (2006) Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions. *Nature* 439, 187–191