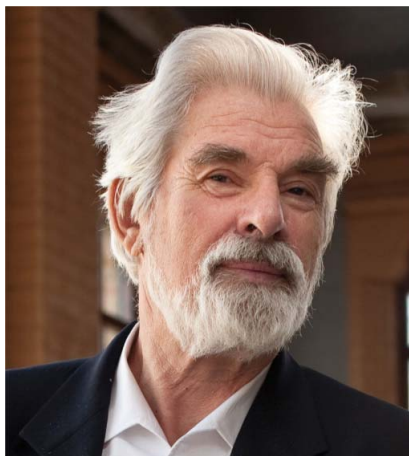


# A 2021. ÉVI FIZIKAI NOBEL-DÍJ ÉGHAJLATKUTATÓ NYERTESEI

Weidinger Tamás, Pongrácz Rita, Tasnádi Péter  
ELTE Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék

A meteorológia a légkör tudománya, *Arisztotelész* szerint a „föld és az ég közötti jelenségeket” vizsgálja [1]. Ugyanakkor a meteorológia „ezer szállal” kapcsolódik a fizikához. Ezt bizonyítja a 2021-es fizikai Nobel-díj is, amit hárman kaptak a komplex rendszerek leírásában elért eredményeikért. Közülük ketten a japán-amerikai *Syukuro Manabe* és a német *Klaus Hasselmann* a Föld légkörének modellezéséért és az ember okozta éghajlatváltozás egyértelmű detektálásáért. A határterületre eső Nobel-díj odaítélését minden bizonnyal az éghajlatváltozás egyre égetőbbé váló problémája is indikálta. Jelzik ezt *Arthur Ashkin* 2018-as Nobel-díjas szavai is, aki azt mondta: nem kíván sok időt tölteni a díj ünneplésével, mert a napenergiával kapcsolatos fontos problémán dolgozik, és a világnak jelenleg nagy szüksége van az éghajlatváltozással kapcsolatos tudományos munkára. („The world badly needs science around climate change right now.”)

Syukuro Manabe 1931-ben született Japánban. Meteorológusként végzett a Tokiói Egyetemen 1955-ben, majd itt szerzett PhD-fokozatot 1958-ban. Ebben az évben érkezett az USA-ba. Dolgozott az USA Meteorológiai Szolgálatánál (U.S. Weather Bureau), majd 1963 és 1997 között a Nemzeti Óceán- és Légkörkutató Hivatal Geofizikai Folyadékdinamikai Laboratóriumá-



ban (National Oceanic and Atmospheric Administration [NOAA] Geophysical Fluid Dynamics Laboratory). 1997 és 2001 között a japán Föld-szimulátor programot irányította, ami egy nagyfelbontású éghajlatrendszer-modell fejlesztését jelenti. 1968 óta a Princeton Egyetem meteorológia professzora.

Klaus Hasselmann Németországban született, szintén 1931-ben. A Hamburgi Egyetem professzor emeritusa. Családjával 1934-ben emigrált Németországból, majd a háború után 1948-ban költöztek vissza Hamburgba. Itt végezte az egyetemet, ahol matematikát és fizikát tanult. 1955-ben szerzett PhD-fokozatot Göttingenben fizikából. Érdeklődése egyre inkább az óceánográfia, illetve a meteorológia-klimatológia felé fordult. 1966-ban lett a Hamburgi Egyetem professzora. 1975 és 1999 között a Max Planck Meteorológiai Intézet igazgatója volt. Maradandót alkotott az éghajlati adatsorok elemzésében, a különböző hatótényezők, így a természetes és antropogén hatások elkülönítésében, erősségük, amplitúdójuk meghatározásában. Új szemléletet hozott mind a hosszú éghajlati idősorok, mind a különböző feltételekkel futtatott globális éghajlati modellekből származó adatsorok elemzésében. Statisztikailag megalapozott módon számszerűsítette az antropogén hatásokat.

Mindkét Nobel-díjas 90 éves, náluk idősebb korban csak *John B. Goodenough* kémikus (2019, 97 évesen)



*Weidinger Tamás* meteorológus az ELTE Meteorológiai Tanszékének habilitált docense. Oktatási területe: általános meteorológia, mikrometeorológia és dinamikus meteorológia. A *Theoretical and Applied Climatology* folyóirat szerkesztője. Kutatási témája a határreteg-meteorológia. A felszíni energiamérleg-komponensek meghatározásával, a nyomanyagok (ózon, ammónia) turbulens kicserélődési folyamataival foglalkozik.



*Pongrácz Rita* meteorológus, hidrológus az ELTE Meteorológiai Tanszékének adjunktusa. Oktatási területe: éghajlatlan, klíma-modellezés, városklimatológia, hidrometeorológia és műhold-meteorológia. Kutatási témája a regionális klímaváltozás, az éghajlati szélsőségek és oszcillációs jelenségek távkapcsolatainak elemzése. A globális éghajlati modellszimulációk regionális leskálázásával, a városi klímamódosító hatásokkal és az összetett extrém időjárási és éghajlati jelenségekkel foglalkozik.

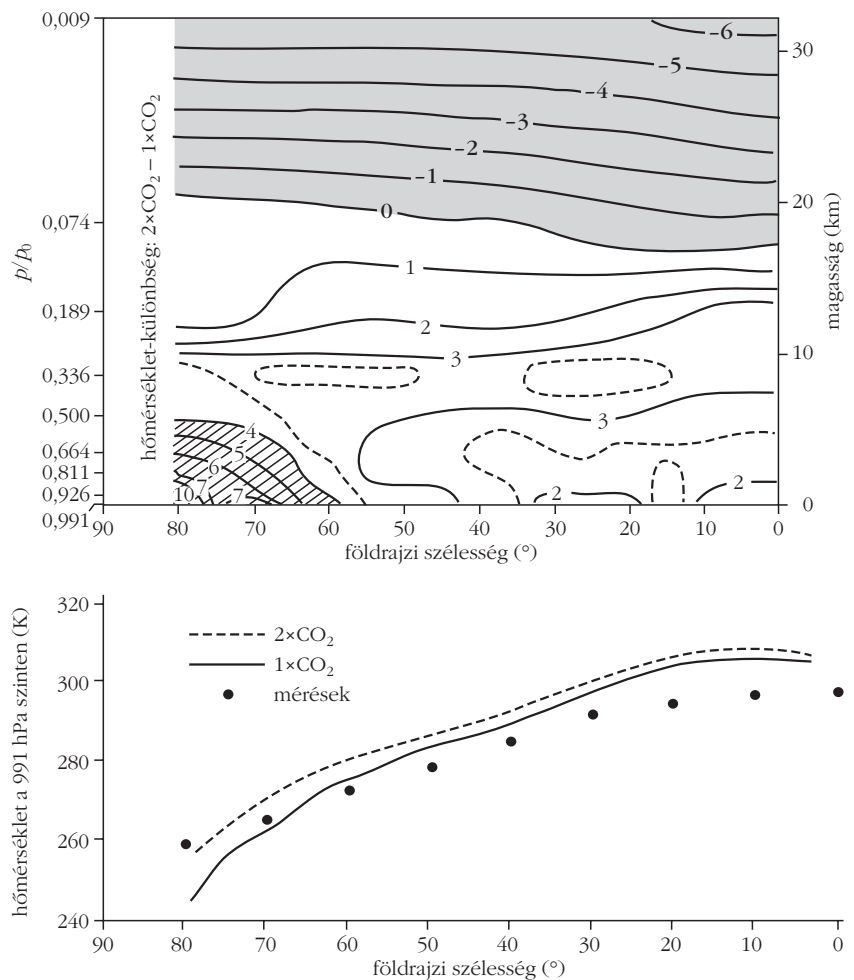
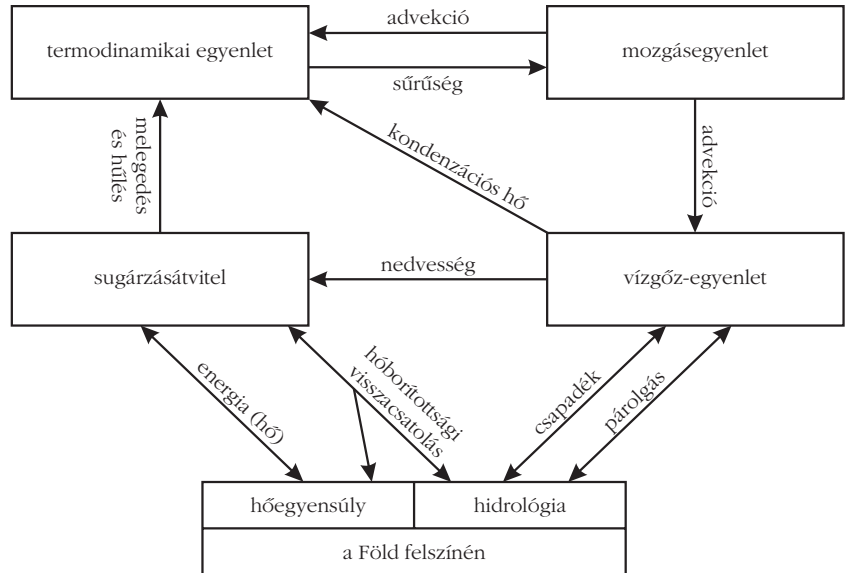


*Tasnádi Péter* matematika-fizika tanár, meteorológus, az ELTE TTK nyugalmazott egyetemi tanára. Tíz évig volt a TTK Oktatási dékánhelyettese. Egyetemi, középiskolai és általános iskolai tankönyvek szerzője. Kutatási területe a dinamikus meteorológia és a fizikatanítás szakmódszertana, korábban a fémfizika volt.

és Arthur Ashkin fizikus (2018, 96 évesen) kapta meg a díjat. A Nobel-díj tehát a kiemelt konkrét eredmények mellett gazdag életművüknek is szól.

## A háromdimenziós általános cirkulációs modellek születése

Az időjárás és az éghajlat numerikus (számszerű) előrejelzése sok tekintetben hasonlít egymáshoz. Az első számítógépes időjárás-előrejelzési modellt 1949-ben futtatták az Amerikai Egyesült Államokban. A *Tellus* című folyóiratban megjelent klasszikus cikk [2] szerzői között ott volt Neumann János is. Az ő kezdeményezésére indult 1955-ben Washingtonban az USA Meteorológiai Szolgálatának keretei között az első globális, háromdimenziós általános cirkulációs modell fejlesztése a teljes légköri hidro-termodinamikai egyenletrendszer megoldásával [3]. A kutatási program vezetője, *Joseph Smagorinsky* meghívására került a csoportba a tehetséges, sok ötlettel és nagy munkabírással rendelkező fiatal Syukuro („Suki”) Manabe. Ők építették be a 3-dimenziós légköri modellbe a sugárzásátviteli folyamatokat, figyelembe véve – már a kezdeteknél – a vízgőz mellett az ózon és a szén-dioxid elnyelési sávjaikat. Egydimenziós sugárzási modellek korábban is voltak. Mára e terület is külön tudományággá vált, részletesen elemezve a légköri összetevők emissziós és abszorpciós sávjaikat [4]. Manabe nevéhez fűződik a konvekció (telítetlen nedves levegő emelkedése, majd fázisátalakulás során a felhő- és csapadékképződés) egyszerű parametrizációs eljárásának beépítése a modellbe. (A parametrizáció a közvetlenül nem modellezett jelenségek leírása egyszerűsített, elsősorban statisztikai közelítések alkalmazásával, ismert, előrejelzett meteorológiai állapotváltozók segítségével.) A hatvanas évek közepétől, már az Ő vezetésével folyó általános cirkulációs modellfejlesztés során egyre több hatásmechanizmust építettek be [5], például a felszíni folyamatok modellezését a turbulens kicserélődési folyamatok, majd a csatolt óceáni-légköri cirkulációs modellek fejlesztése révén. Mindez hozzájárult a hidrológiai ciklus egyre pontosabb leírásához.



1. ábra. Manabe és Wetherald [6] általános cirkulációs modelljében szereplő egyenletek, parametrizációs eljárások és a közöttük levő kapcsolatrendszer (fölül). A kétszeres ( $2\times\text{CO}_2$ ) és az ipari forradalom előtti szén-dioxid szint (standard,  $1\times\text{CO}_2$ ) mellett számított stacionárius modelleredmények szélességi körök szerint átlagolt különbsége (középen). Az  $1\times\text{CO}_2$  és a  $2\times\text{CO}_2$  feltételekkel kapott, szélességi körök szerint átlagolt felszínközeli (991 hPa, első modellszint) hőmérséklete a mérési eredményekkel összehasonlítva (alul).

Manabe és Wetherald 1975-ben publikált cikkében [6] az ipari forradalom előtti szén-dioxid-koncentráció (280 ppm, 1 millió molekulából 280 a CO<sub>2</sub>-molekula) megduplázódására (560 ppm-es koncentráció) 2,9 °C-os globális hőmérsékletváltozást adott az első, felszín közelében levő modellszintre. A növekvő hőmérséklet nagyobb légköri vízgőz-koncentrációt és kismértékben növekvő csapadékot adott. A modell egyszerű domborzattal (egy kontinens, egy óceán) dolgozott az Egyenlítő és a 85. szélességi kör között Mercator-féle térképsík felett, 500 km-es horizontális rácsfelbontással és 9 vertikális szinttel. Az alkalmazott összefüggéseket, parametrizációkat és a köztük levő kapcsolatokat az 1. ábra felső panelje szemlélteti.

Stacionárius (egyensúlyi) modellszámítások során a 2×CO<sub>2</sub> (megduplázódott) és az 1×CO<sub>2</sub> (ipari forradalom előtti) koncentrációra vonatkozó modellfuttatások közötti hőmérséklet-különbség hosszúsági körök szerinti eloszlását az 1. ábra középső része mutatja be az alsó 30 km-es rétegben. A troposzférában és az alsó sztratoszférában (azaz az alsó 15–20 km-es rétegben) melegedést, felette a sztratoszférában kismértékű hűlést jelzett a modell. A felszín közelében az egyenlítői és a szubtrópusi térségekben kisebb, míg a magas szélességeken nagyobb, 5–7 °C feletti melegedést is adott a modell.

A felszínközeli első modellszintre vonatkozó megfigyelt hőmérsékleti adatokat, továbbá az 1×CO<sub>2</sub> és a 2×CO<sub>2</sub> feltételekkel kapott stacionárius modelleredmények szélességi körök szerint átlagolt értékeit az 1. ábra alsó grafikonja szemlélteti. Amikor éghajlatváltozásról beszélünk, természetesen mindig a modellklímák közötti eltéréseket (2×CO<sub>2</sub> – 1×CO<sub>2</sub>) vesszük számba.

## Hasselmann sztochasztikus modellje

A modellek elméleti konstrukciójában, az éghajlat változékonyságának leírásában ért el alapvető eredményeket Klaus Hasselmann. 1976-ban írt cikkében világosan szétválasztotta az időjárás és az éghajlat változékonyságának kérdését, és megalkotta a sztochasztikus éghajlati modellek elméletének alapjait [7]. A légkör-óceán-szárazföld-krioszféra rendszer jellemzésére véges számú,  $m$  darab,  $\mathbf{z} \equiv (z_1, z_2, \dots, z_m)$  változót vezetett be. Mindegyik változó időfüggő, amelyekre a modellekben

$$\frac{dz_i}{dt} = w_i(z)$$

prognosztikai egyenletek írhatók fel. Itt  $w_i$  az egyes változók időbeli deriváltját megszabó, ismertnek tekintett fizikai hatás. Feltételezte továbbá, hogy a rendszer két alrendszerre bontható  $\mathbf{z} = \mathbf{z}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ , amelyek nagyon eltérő  $\tau_x, \tau_y$  karakterisztikus időkkel jellemezhetők (az egyik a gyors időjárási fluktuációkat, a másik a lassú éghajlati változásokat tartalmazza). Így a prognosztikai egyenletek két csoportra

$$\frac{dx_i}{dt} = u_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad \text{és} \quad \frac{dy_i}{dt} = v_i(\mathbf{x}, \mathbf{y})$$

esnek szét, amelyek nagyságrendjére:

$$O\left[x_i \left(\frac{dx_i}{dt}\right)^{-1}\right] = \tau_x \quad \text{és} \quad O\left[y_i \left(\frac{dy_i}{dt}\right)^{-1}\right] = \tau_y.$$

A gyors  $x_i$  változók az időjárást jellemzik, a lassú  $y_i$ -k pedig az éghajlatot ( $\tau_x \ll \tau_y$ ). Az időjárás előrejelzésére szolgáló modellekben utóbbiak állandók, az éghajlati változások leírásában azonban ők a lényeges változók. A karakterisztikus idők az időjárási változók esetén néhány naposak, míg az éghajlati jellemzőkben néhány hónaposak, évesek, vagy még nagyobbak, akár évezredek is lehetnek.

Hasselmann feltételezte, hogy az éghajlat változékonyságát kifejező prognosztikai egyenletek integrálásakor az időjárási változók gyors változásai elhanyagolhatók, így a prognosztikai egyenletekben a változást okozó hatások (a jobb oldaliak) kiátlagolhatók:

$$\frac{dy_i}{dt} = \langle v_i(\mathbf{x}, \mathbf{y}_0) \rangle.$$

Az átlagolást olyan  $\tau_i$  időre kell elvégezni, amely nagy a gyors folyamatok karakterisztikus idejéhez képest, de kicsi az éghajlati változókhoz viszonyítva, azaz  $\tau_x < \tau_i < \tau_y$ . Ilyen időkre vonatkozó átlagolásakor, az éghajlati változók állandónak tekinthetők. Feltételezve, hogy a változók eloszlása ergodikus, az időátlag halmazátlaggal helyettesíthető.

Ezekkel az egyszerűsítésekkel a modell determinisztikussá válik. Kis módosításával azonban reálisabb elképzeléshez juthatunk. Legyen az éghajlati változók megváltozása a  $t = 0$  időpillanatbeli  $\mathbf{y} = \mathbf{y}_0$  állapotból kiindulva  $t < \tau_y$  idő elteltével  $\delta\mathbf{y} = \mathbf{y} - \mathbf{y}_0$ ! Bontsuk fel a megváltozást  $\delta\mathbf{y} = \langle \delta\mathbf{y} \rangle + \mathbf{y}'$  átlagos és fluktuációs tagra! Az átlagos részre a prognosztikai egyenletről

$$\langle \delta\mathbf{y} \rangle = \langle \mathbf{v}(\mathbf{x}, \mathbf{y}_0) \rangle \cdot t$$

adódik, s így a fluktuációkra felírt egyenlet:

$$\frac{d\mathbf{y}'}{dt} = \mathbf{v}(\mathbf{x}, \mathbf{y}_0) - \langle \mathbf{v} \rangle = \mathbf{v}'.$$

A fluktuációkról Hasselmann feltételezte, hogy azok stacionárius véletlen folyamatok. A modellt negatív visszacsatolással is bővítette, hogy az éghajlati változók stacionáriusak maradjanak. Ezzel már bonyolult, negyedrendű Fokker–Planck-differenciálegyenlethez jutott.

A modell teljes kibontására jelen cikkben nincsen elegendő hely, részletes értékelő tárgyalása megtalálható például Dobrovolski [8] könyvében. Ugyanakkor a modell lényegét megérthetjük kvalitatív módon a Hasselmann által is használt Brown-mozgással vett

analógia alapján. Az éghajlati modell egyenletei analógiába hozhatók a kicsiny részecskékből álló, nyugvó folyadékban mozgó, nagyobb virágporszemcsék mozgását leíró egyenletekkel. Az éghajlati változók a nagy szemcsék koordinátáinak, az időjárásiek pedig a kicsinyeknek feleltethetők meg. A Brown-mozgás leírásakor a kicsiny részecskék pontos mozgását nem is kell ismernünk, ha a nagy szemcsék véletlen vándorlását akarjuk leírni. Ehhez hasonlóan a csatolt éghajlati modellekben a hosszú távú változások leírhatók anélkül, hogy a szinoptikus skálájú változásokat pontosan figyelembe vennénk.

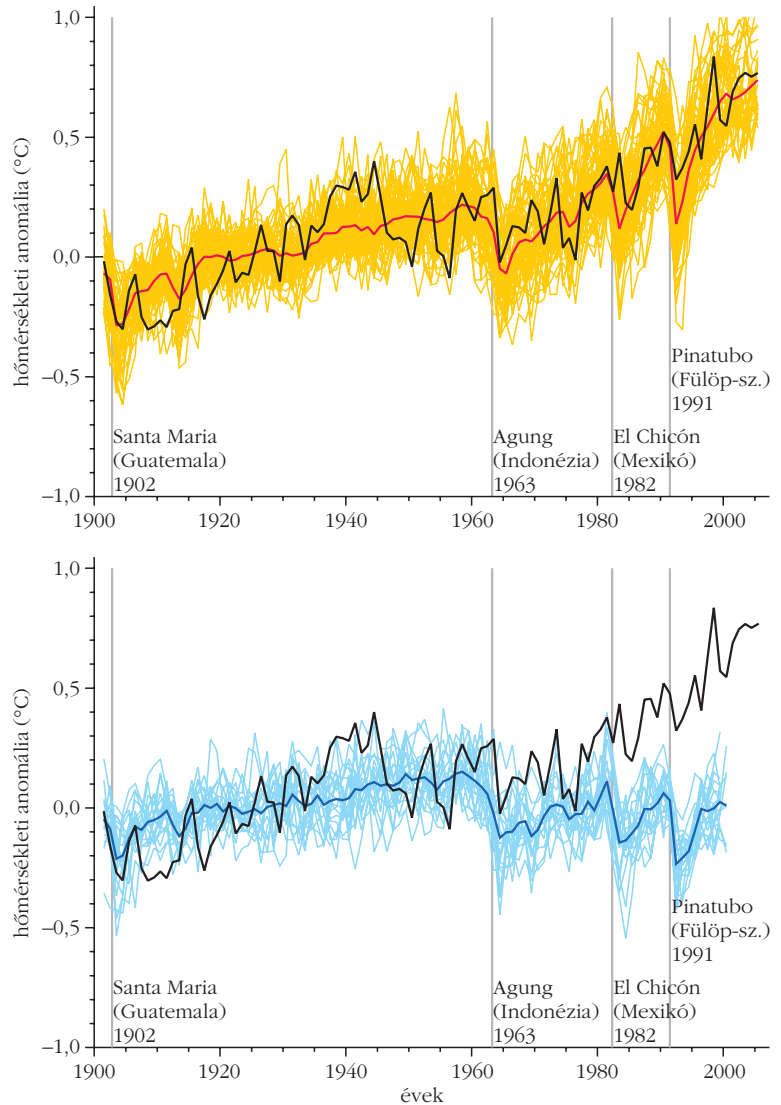
## Példa a természetes és antropogén hatások elkülönítésére

Az éghajlati modellezés mellett fontos szerepet kap a mért meteorológiai idősorok elemzése, illetve az egyre bővülő éghajlati modellszámítások mint adott helyre, térségre vonatkozó statisztikai idősorok együttes elemzése. E kutatási iránynak is nagy hagyományai vannak, amelyek keretében a megválaszolandó kérdések a következők: Hogyan adható meg a mért vagy modellezett adatsorban, vagy adatsorok együttesében a különböző hatások, hatótényezők szerepe? Milyen tényezők és hogyan alakítják, magyarázzák az adatsorokat?

A csatolt légkör-óceán általános cirkulációs modellek segítségével a világ számos éghajlat-modellező központjában végeznek kiterjedt modellfuttatásokat a jelenlegi éghajlat rekonstrukciójára

- a mért, növekvő üvegház-gáz és aeroszol (elsősorban szulfát-aeroszol) koncentrációk figyelembevételével (*antropogén + természetes hatások*), illetve
- az antropogén hatások nélküli, *természetes hatások*, így például a vulkánkitörésekből származó kibocsátások (elsősorban aeroszol-részecskék) figyelembevételével.

Mindkét esetben több éghajlat-modellező központ futtatásait használták, ezekből készítettek sokasági átlagokat. Az antropogén hatásokat is tükröző modellszámítások szignifikáns egyezést mutattak a globális rácsponti adatszorból számított földi átlaghőmérséklet-menettel (2. ábra). Jól látható az antropogén hatások keltette hőmérséklet-változás dinamikája is (az ábra felső és alsó grafikonjának összevetése). A csatolt légkör-óceán általános cirkulációs modellek leírják a vulkánkitörések hatását, az átmeneti globális hőmérséklet-csökkenést. Mindemellett mód van az antropogén hatások keltette változások számszerűsítésére is.



2. ábra. A megfigyelt (HadCRUT3; [13]) (fekete vonal) és a különböző csatolt légkör-óceán általános cirkulációs modellek alapján számított globális átlaghőmérsékleti anomáliák (sárga vonalak) menete az *antropogén + természetes* hatások figyelembevételével és ezek sokasági átlaga (piros vonal) a referencia-időszakhoz (1901–1950) viszonyítva (föül). A megfigyelt (fekete vonal) és a különböző csatolt légkör-óceán általános cirkulációs modellek alapján számított globális átlaghőmérsékleti anomáliák (világoskék vonalak) menete a *természetes hatások* figyelembevételével, és ezek sokasági átlaga (sötétkék vonal) a referencia-időszakhoz (1901–1950) viszonyítva (alul). A grafikonokon feltüntettük a legfontosabb vulkánkitöréseket. Jól látható a vulkánkitörések utáni globális átmeneti hőmérsékletcsökkenés mindhárom időszorban [14, 15].

Hasselmann és munkatársai többváltozós lineáris regresszió alapuló statisztikai módszert fejlesztettek ki az éghajlatváltozást okozó hatások elkülönítésére, figyelembevéve az éghajlati rendszer természetes változékonyságát [9, 10]. Kimutatták a szén-dioxid (pontosabban az üvegházhatású gázok növekvő koncentrációjának szén-dioxid egyenértékben kifejezett értékének) meghatározó szerepét a légköri hőmérséklet növekedésében. Elkülöníthetővé vált a légköri szén-dioxid növekedéséből és az éghajlatváltozás természetes összetevőjéből adódó hatás a megfigyelt éghajlati adatsorokban, ami a klímaváltozásra adott társadalmi változás szempontjából elsődleges fontosságú [11, 12].

## Az IPCC (2014) jelentésben használt forgatókönyvek legfontosabb jellemzői

üvegházhatású gázok egyesített koncentrációja (ppm CO <sub>2</sub> -egyenérték) 2100-ban	RCP (reprezentatív koncentrációpálya) forgatókönyv	üvegházhatású gázok antropogén kibocsátásának változása 2010-hez képest (százalék)		2100-ig a jelzett globális melegedési szint alatt maradási valószínűség (1850–1900 időszakhoz képest)				
		2050-re	2100-ra	1,5 °C	2 °C	3 °C	4 °C	
450 (430–480)	RCP2.6	-72 – -41	-118 – -78					
500 (480 – 530)		530 fölé nem emelkedik	-57 – -42	-107 – -73				
		530 fölé emelkedhet	-55 – -25	-114 – -90				
550 (530 – 580)		580 fölé nem emelkedik	-47 – -19	-81 – -59				
	580 fölé emelkedhet	-16 – +7	-183 – -86					
580 – 650	RCP4.5	-38 – +24	-134 – -50					
650 – 720		-11 – +17	-54 – -21					
720 – 1000	RCP6.0	+18 – +54	-7 – +72					
> 1000	RCP8.5	+52 – +95	+74 – +178					

A színskála magyarázata:

	valószínű		inkább nem valószínű, mint igen
	inkább valószínű, mint nem		valószínűtlen
	körülbelül ugyanannyira valószínű, mint nem		egyáltalán nem valószínű

Az RCP forgatókönyvekben szereplő számok az éghajlati kényszer W/m<sup>2</sup> egységben kifejezett értékei. Egyszerűen fogalmazva: ennyivel nőne a felszínre jutó sugárzás (rövid- és hosszuhullámú összege) az ipari forradalom előtti szinthez képest. A növekvő felszínre jutó sugárzás módosítja a felszíni energiaháztartást. Változik a szenzibilis (érzékeny) és a latens hőszállítás (azaz a párolgás) értéke, továbbá a növekvő felszínhőmérséklet miatt nagyobb lesz a hosszuhullámú kisugárzás is (a Stefan–Boltzmann-törvény miatt). Az energiátöbblet egy része < 1 W/m<sup>2</sup> az óceánokban tárolódik. Összességében azonban a Föld-légkör rendszeren áthaladó energiához képest a tárolási tag elhanyagolható. A rendszer „új” egyensúlyra törekszik.

–100%-ot meghaladó kibocsátáscsökkentés esetén további CO<sub>2</sub>-nyelő kapacitásokat kellene kialakítani.

## Záró gondolatok

Ahogy a különböző építészeti stílusok követték egymást a klasszikustól a díszes barokk és rokokó épületeken át a szecesszióig keresztül a mai irányzatokig, ugyanúgy széles spektruma van a különböző bonyolultságú éghajlati modelleknek is. Mindez a kérdésfeltevéstől, a vizsgált folyamatok jellegétől függ. Így a tudományos megismerésben egyaránt helye van az egyre részletesebb egydimenziós sugárzás-átviteli modelleknek [16], az éghajlati rendszer működését vizsgáló leegyszerűsített légkör-óceán általános cirkulációs modelleknek [17] és a nagyfelbontású – akár 2,5–80 km-es –, az éghajlati rendszer komplex modellezését célként kitűző Föld-szimulációs modelleknek [18].

Gazdag tárháza van a globális cirkulációs modellek regionális éghajlati modellekkel történő leskálázásá-

nak is. Itt a cél egy-egy behatárolt terület, így hazánk, a Kárpát-medence éghajlati folyamatainak, a változások tendenciáinak jobb megértése [15, 19, 20].

Jó hír, hogy a mértékadó éghajlati modellek hasonló változási irányokat, tendenciákat jelölnek ki. Nincs lényegi különbség Manabe és Wetherald 1975. évi modelleredménye [6] (megduplázódott CO<sub>2</sub>-koncentráció esetén várt 2,9 °C-os globális melegedés) és a frissebb eredmények között. Ezt szemlélteti az IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change – Éghajlatváltozási Kormányközi Testület) 2014-ben megjelent jelentéséből vett összefoglalás (1. táblázat). Az ipari forradalom előtti CO<sub>2</sub>-koncentráció duplázódásához (560 ppm) tartozó mértékadó becslés szerint kis valószínűsége van a 2 °C-os globális hőmérséklet-emelkedésnek, inkább a 3 °C-os változás a valószínű. Tudjuk továbbá az éghajlati rendszer fizikájából, hogy a globális átlagnál kisebb az óceánok és nagyobb a

szárazföldre melegedése, így hazánkban is a globális átlagot meghaladó hőmérsékletemelkedésre kell számítanunk [15].

Hol tartunk most? 2020-ban az évi átlagos CO<sub>2</sub>-koncentráció 412,5 ppm volt, a növekedési ütem hozzávetőlegesen 2,6 ppm/év. 430–480 ppm-es globális átlagkoncentráció esetén a Párizsi Megállapodásban ideális célul kitűzött 1,5 °C-os globális melegedés már kevésbé valószínű, mint a szükséges határként megadott 2 °C-os változás. A jelenlegi tendenciák mellett ugyanakkor világszerte óriási erőfeszítésekre van szükség annak érdekében, hogy ezeket a melegedési értékeket, illetve a hozzájuk rendelhető koncentrációk szinteket ne lépjük túl.

## Irodalom

1. Mészáros E.: Ókori meteorológia: ahogy Arisztotelész gondolta. *Magyar Tudomány* 2006/2 197. <http://epa.oszk.hu/00600/00691/00026/12.html>
2. Charney, J. G., Fjörtoft, R., von Neumann, J.: Numerical Integration of the Barotropic Vorticity Equation. *Tellus* 2/4 (1950) 237–254. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1950.tb00336.x>
3. Weart, S.: The development of general circulation models of climate. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 41 (2010) 208–217. <https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2010.06.002>
4. Tóbiás, R., Furtenbacher, T., Simkó, I., Császár, A. G., Diouf, M. L., Cozijn, F. M. J., Staa, J. M. A., Salumbides, E. J., Ubachs, W.: Spectroscopic-network-assisted precision spectroscopy and its application to water. *Nature Communications* 11 (2020), article number: 1708. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-15430-6>
5. Manabe, S.: Climate and the Ocean Circulation: I. The Atmospheric Circulation and the Hydrology of the Earth's Surface. *Monthly Weather Review* 97/11 (1969) 739–774. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1969\)097<0739:CATOC>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1969)097<0739:CATOC>2.3.CO;2)
6. Manabe, S., Wetherald, R. T.: The Effects of Doubling the CO<sub>2</sub> Concentration on the Climate of a General Circulation Model. *Journal of the Atmospheric Sciences* 32/1 (1975) 3–15. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1975\)032<0003:TEODTC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1975)032<0003:TEODTC>2.0.CO;2)
7. Hasselmann, K.: Stochastic climate models Part I. Theory. *Tellus* 28/6 (1976) 473–485. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1976.tb00696.x>
8. Dobrovolski, S. G.: *Stochastic Climate Theory*. Heidelberg–Berlin–New York–Barcelona–Hong Kong–London–Milan–Paris–Singapore–Tokyo: Springer (2000) 282 pp. ISBN: 978-3-662-04119-2
9. Hasselmann, K.: Multi-pattern fingerprint method for detection and attribution of climate change. *Climate Dynamics* 13 (1997) 601–611. <https://doi.org/10.1007/s003820050185>
10. IPCC, 2001: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [J. T. Houghton, Y. Ding, D. J. Griggs, M. Noguer, P. J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C. A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881 pp.
11. Jones, G. S., Stott, P. A., Christidis, N.: Attribution of observed historical near-surface temperature variations to anthropogenic and natural causes using CMIP5 simulations. *Journal of Geophysical Research, Atmospheres* 118 (2013) 4001–4024. doi:10.1002/jgrd.50239, 2013
12. IPCC, 2014: *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 1–31. (Magyar nyelvű kiadás: *Éghajlatváltozás 2014. Szintézis Jelentés Döntéshozói Összefoglaló*. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar5-spm-syr\\_Hungarian.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar5-spm-syr_Hungarian.pdf))
13. Brohan, P., Kennedy, J. J., Harris, I., Tett, S. F. B., Jones, P. D.: Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new data set from 1850. *Journal of Geophysical Research, Atmospheres* 111 (2006) D12106. <https://doi.org/10.1029/2005JD006548>
14. IPCC, 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 [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.
15. Bartholy J., Bozó L., Haszpra L. (szerkesztők): *Klímaváltozás – 2011. Klímaszcenáriók a Kárpát-medence térségére*. Kiadja MTA MTB és ELTE Meteorológiai Tanszék (2011) 287. <http://nimbus.elte.hu/~klimakonyv/Klimavaltozas-2011.pdf>
16. Kluff, L., Dacie, S., Buehler, S. A., Schmidt, H., Stevens, B.: Re-Examining the First Climate Models: Climate Sensitivity of a Modern Radiative-Convective Equilibrium Model. *Journal of Climate* 32/23 (2019) 8111–8125. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0774.1>
17. Herein, M., Márfy, J., Drótos, G., Tél, T.: Probabilistic Concepts in Intermediate-Complexity Climate Models: A Snapshot Attractor Picture. *Journal of Climate* 29 (2016) 259–272. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-15-0353.1>
18. Hohenegger, C., Kornbluh, L., Klocke, D., Becker, T., Cioni, G., Engels, J. F., Schulzweida, U., Stevens, B.: Climate statistics in global simulations of the atmosphere, from 80 to 2.5 km grid spacing. *Journal of the Meteorological Society Japan* 98 (2020) 73–91. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2020-005>
19. Torma, Cs., Giorgi, F.: On the evidence of orographical modulation of regional fine scale precipitation change signals: The Carpathians. *Atmospheric Science Letters* 21/6 (2020) e967. <https://doi.org/10.1002/asl.967>
20. Varga, Á. J., Breuer, H.: Sensitivity of simulated temperature, precipitation, and global radiation to different WRF configurations over the Carpathian Basin for regional climate applications. *Climate Dynamics* 55 (2020) 2849–2866. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05416-x>



**Az Eötvös Társulat  
főnt van a **facebook**-on!**



<https://www.facebook.com/pages/Eötvös-Loránd-Fizikai-Társulat/434140519998696?fref=ts>

Szerkesztőség: 1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint III., Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

A Társulat Internet honlapja <http://www.elft.hu>, e-postacíme: [elft@elft.hu](mailto:elft@elft.hu)

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős kiadó Groma István főtákar, felelős szerkesztő Lendvai János főszerkesztő.

Kéziratokat nem örzünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.

Nyomdai előkészítés: Kármán Stúdió, nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szathmáry Attila ügyvezető igazgató.

Terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszámlán.

Megjelenik havonta (nyáron duplaszámmal), egyes szám ára: 1000.- Ft (duplaszámé 2000.- Ft) + postaköltség.

**HU ISSN 0015-3257** (nyomtatott) és **HU ISSN 1588-0540** (online)