

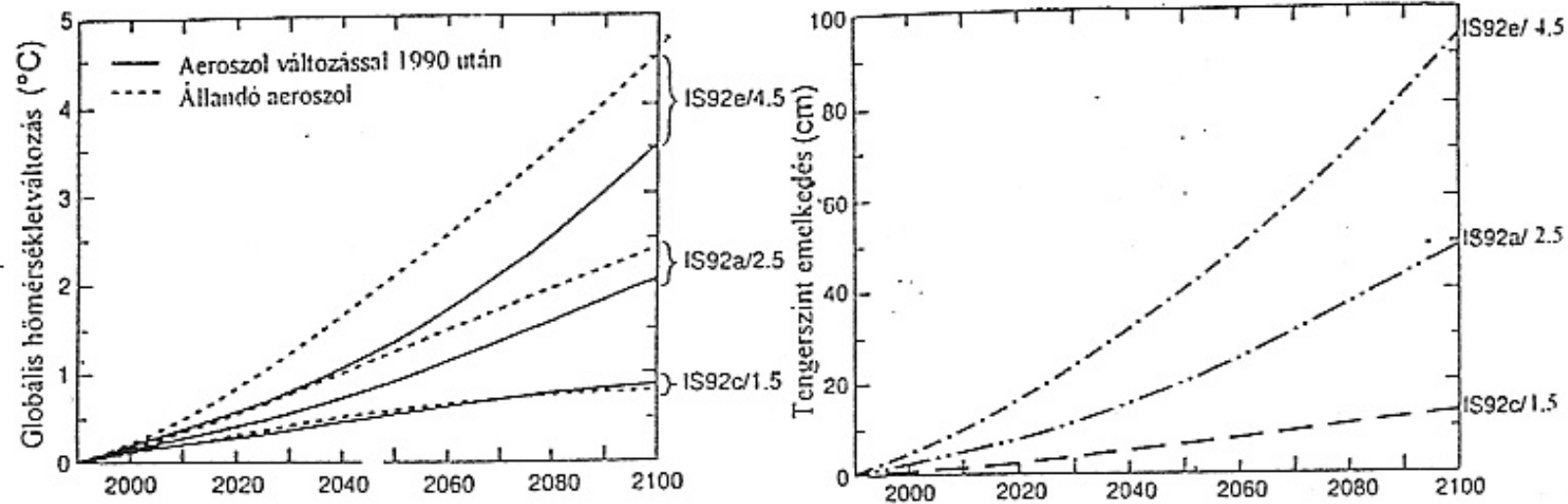
# A GLOBÁLIS FELMELEGEDÉS VÁRHATÓ JELLEGZETESSÉGEI ÉS HATÁSAI MAGYARORSZÁGON I.



- ◆ Környezetünk állapota szempontjából az éghajlat egyszerre *erőforrás és kockázat*.
- ◆ Az éghajlat fontos sajátossága, hogy fő jellemzőit csak részben alakítják a helyi vagy regionális fizikai-földrajzi feltételek.
- ◆ Ennél általában nagyobb szerepet játszik a légkörzés teljes földi, de legalábbis északi félgömbi rendszere.
- ◆ E két utóbbi éghajlat-alakító tényező szövevényes, nemlineáris differenciálegyenletek rendszerével leírható rendjét az utóbbi évtizedekben egyre erősebben veszélyezteti *a globális felmelegedés*.
- ◆ Ez még akkor is így van, ha az elmúlt évek tragikus árvizei, aszályai, sőt egyedi forgószelei nyomán világszerte gyakran elhangzik az (a ma még nem kielégítően bizonyított) állítás, hogy ezek az időjárási anomáliák már a klímaváltozás következményei (előjelei) volnának.



- ◆ Az éghajlatot is ugyanazok a fizikai törvények irányítják, mint az időjárást. Az éghajlat fejlődése nem számolható előre a légkörrel kölcsönhatásban álló óceánok, a szárazföldek, a krioszféra (szilárd halmazállapotú víz) fizikájának bekapcsolása nélkül.
- ◆ Ugyanakkor (a globális klímamodellekben eddig végzett valamennyi kísérlet szerint) a várható üvegházgáz- és aeroszolkoncentrációk igen széles sávjának bármelyik változata esetén, *az éghajlat fokokban kifejezhető változás, melegedés előtt áll.*
- ◆ Minden számítás tehát arra utal, hogy e gázok légköri töménységének várható jövőbeni alakulása emelni fogja a Föld átlaghőmérsékletét.
- ◆ Sőt, a tapasztalati bizonyítékok alapján *úgy tűnik, hogy már eddig is kimutathatóan megemelte.*



*A globális átlaghőmérséklet és a tengervíz szintjének előrejelzett változásai az üvegházhatás erősödésének (IS92c, a, e) és az éghajlati rendszer érzékenységének (1,5, 2,5 ill. 4,5 °C melegedés a széndioxid koncentráció állandósult megkétszereződése esetén) kis, közepes és nagy értékei esetén. (IPCC, 1996)*

- ◆ Ezért a tudományos közösségek erőfeszítéseket tettek a klímaváltozás perspektívájának pontosabb behatárolására, majd arra, hogy megnyíljon az út a melegedés globális korlátozására.
- ◆ E folyamat egyik állomása volt (még 1988-ban) az ENSZ égisze alatt a Klímaváltozás Kormányközi Testülete (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) létrehozása, amely időről időre összefoglalja a problémakör tudományos vonatkozásait.
- ◆ A legutóbbi, Harmadik Helyzetértékelő Jelentés tematikus kötetei (Tudományos alapok; Hatások és alkalmazkodás; Korlátozás) 2001-ben láttak napvilágot, majd még abban az évben a három témakört a nyilvánosság és a döntéshozók számára egybefogó, negyedik kötet is készült.

# Az éghajlatváltozás hatótényezői

## A légkör üvegházhatása

- ◆ A légkör üvegházhatásának antropogén erősödése miatt a jövő század közepére a Föld hőmérséklete magasabbra emelkedhet, mint a történelem során valaha.
- ◆ Ezért olyan üvegházgázok bizonyított emelkedő tendenciája a felelős, mint elsősorban a szén-dioxid ( $\text{CO}_2$ ), a metán ( $\text{CH}_4$ ), a dinitrogén-oxid ( $\text{N}_2\text{O}$ ) és a halogénezett szénhidrogének.
- ◆ E gázokon keresztül a Nap sugarai szinte zavartalanul lejutnak a felszínre, de az onnan kiinduló, nagyobb hullámhosszú energia egy részét e gázok (továbbá a felhők és a vízgőz) elnyelik és visszasugározzák a felszín irányában. A légkörnek ez az *üvegházhatása* már ma körülbelül 30-33 °C-kal emeli a hőmérsékletet.

*Megjegyzések:* 1 ppm = 10<sup>-6</sup>; 1 ppb = 10<sup>-9</sup>; 1 ppt = 10<sup>-12</sup> térfogatarány.

Az antropogén halogénezett szénhidrogének száma több, mint 100.

*1. táblázat*

**A legfontosabb üvegház-gázok és néhány jellemzőjük**

	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	CFC-11	HCFC-22
Kezdeti koncentráció (1750-ben)	278 ppm	700 ppb	275 ppb	Nulla!	Nulla!
Koncentráció 1998-ban	365 ppm	1745 ppb	314 pbb	268 ppt	132 ppt
Eddigi elsődleges sugárzási hatás	1,46 Wm <sup>-2</sup>	0,48 Wm <sup>-2</sup>	0,15 Wm <sup>-2</sup>	0,07 Wm <sup>-2</sup>	0,03 Wm <sup>-2</sup>
Koncentráció	1,5 ppm/év	7 ppb/év	0,8 ppb/év	-1,4 ppt/év	5 ppt/év
Növekedés	0,4%/év	0,4%/év	0,03%/év	-0,5%/év	+4%/év
Légköri élettartam (év)	50-200	8-12	120	45	12
Globális Melegítő Potenciál (100 év)	1	23	296	4600	1700



- ◆ Az emberi tevékenység éghajlat-módosító hatásának veszélyességét fokozza, hogy az üvegházgázok többségének igen hosszú a légköri tartózkodási ideje
- ◆ A metán már 8-12 év után kikerül a légkörből, de a legfontosabb freonfajták csak 10-200, a dinitrogénoxid mintegy 120 év elteltével bomlik el a légkör felsőbb rétegeiben.
- ◆ A légkört antropogén eredetű többletként terhelő szén-dioxid molekulák akár 200 évet is e közegben tartózkodhatnak, mielőtt azokat az óceán, vagy a bioszféra elnyelné. (Ha a szén-dioxid molekulák forrása nem haladná meg folyamatosan a nyelők kapacitását, vagyis a koncentrációnövekedés helyett egyensúly állna fenn, akkor ez az élettartam is csak körülbelül egy évtized volna.)
- ◆ A hosszú élettartam következménye, hogy e gázok koncentrációja a Föld területén közel egyenletes, hiszen van idő arra, hogy a légáramlás azokat az ipari és lakossági forrásoktól távoli területekre is eljuttassa.
- ◆ Egy másik, súlyos következmény, hogy a koncentrációk csak évtizedes, évszázados késéssel követik a kibocsátás időbeli dinamikáját.

- ◆ Vagyis, ha valamikorra az emberiség képes is lesz megállítani a légköri üvegházhatást fokozó gázok kibocsátásának növekedését, a korábbi kibocsátások következményeit az utókor akkor is még hosszú időn át tapasztalni fogja.
- ◆ Sőt, minthogy a legtöbb ilyen gáz kibocsátása ma meghaladja a nyelők kapacitását, a kibocsátás szinten maradása is még emeli a koncentrációkat.
- ◆ A számítások szerint az a változás, amely a légköri energiaháztartásban az ipari forradalom kezdete óta az üvegházgázok koncentrációjának növekedése miatt bekövetkezett, a légkör alsó rétegeinek energiabevétele tekintetében, megközelíti a  $2,5 \text{ Wm}^{-2}$ -t, és az eddigi kibocsátási tendenciák folytatódásával - a század közepére elérheti a  $5 \text{ Wm}^{-2}$ -t, a század végére pedig a  $9 \text{ Wm}^{-2}$ -t (IPCC, 2001).
- ◆ Az eddigi változásból a szén-dioxid  $+1,46 \text{ Wm}^{-2}$ , a metán  $+0,48 \text{ Wm}^{-2}$ , a dinitrogén-oxid  $+0,15 \text{ Wm}^{-2}$ - míg a freonok  $+0,34 \text{ Wm}^{-2}$  sugárzási kényszerért felelősek.
- ◆ E számok tulajdonképpen csekélyek a Nap által a földi éghajlati rendszerbe sugározott  $240 \text{ Wm}^{-2}$ -rel szemben, ám ebből nem a hatások jelentéktelensége, hanem - miután nem elhanyagolható hőmérsékletváltozást okoznak - inkább az éghajlat jelentős érzékenysége következik.

**A különféle antropogén és természetes éghajlati kényszerek becsült elsődleges sugárzási hatása a természetes állapot (körülbelül 1750) óta.**

	Elsődleges sugárzási hatás $Wm^{-2}$	Bizonyosság mértéke
CO <sub>2</sub>	+1,46	M
CH <sub>4</sub>	+0,48	M
N <sub>2</sub> O	+0,15	M
Összes CFC, HCFC	+0,34	M
Troposzférikus ózon	+0,35	K
Sztratoszférikus ózon	-0,15	K
Direkt összaeroszol	-0,50	A
Direkt ásványi aeroszol	-0,6 - +0,4	IA
Indirekt aeroszol	0 - -2,0	IA
Repülési csík	+0,04	IA
Földhasználat	-0,2	IA
Napállandó	+0,3	IA

- ◆ *Megjegyzés:* A bizonyosság esetében: M - magas, K - közepes, A - alacsony, IA-igen alacsony.

# További antropogén éghajlat-módosító hatások

- ◆ Az éghajlatunkat befolyásoló antropogén hatások körébe immár bele kell érteni az aeroszoloikat (por, korom, szulfátok, homok, tengeri sók stb.) is, amelyek a napsugárzás egy részét visszaverik, illetve a magasabb légrétegekben elnyelik, ezáltal a felszínre érkező sugárzásmennyiség csökkenését okozzák, s ily módon az üvegházhatással ellentétes hatást váltanak ki.

Az antropogén, elsősorban szulfát-aeroszok ugyanakkor megváltoztathatják a felhőzet szerkezeti és sugárzás-átviteli jellemzőit is, ami áttételesen ugyancsak klímaváltozást jelentene. A légkör aeroszoltartalmát a térfogati koncentráció, a kémiai összetétel, a részecskék alakja és méret szerinti eloszlása együttesen határozza meg. A légköri aeroszol az elmúlt évtizedekben - különösen az iparosodott területeken és azok tágabb környezetében - jelentősen gyengítették az üvegházgázok okozta felmelegedést.

Az aeroszokok egy része ugyanakkor el is nyeli a sugárzást, ami melegítő hatást okoz. Az aeroszokok légkörbe kerülésével közvetlenül összefüggő, direkt hatás (sugárzásszórás és -elnyelés) összességében hűtő hatású. Az aeroszokok egy része emellett módosíthatja azt, hogy a felhők víztartalma hány víz- vagy jégcseppenként helyezkedik el. Ez az *indirekt hatás* szintén korlátozza a felmelegedést, de - az aeroszokok fenti, direkt hatásához hasonlóan - területileg nagyon egyenetlen mértékben. Ennek oka, hogy a troposzférikus aeroszokok légköri tartózkodási ideje csupán néhány nap, vagy hét, ami alatt nincs idejük a forrásoktól (városok, ipartelepek) távol egyenletesen elkeveredni.

A *felszín állapotának* változása globális átlagban nem okoz számottevő klímaváltozást, noha regionális hatása akár az éghajlatra, de még inkább más szférákra, az ökológiai egyensúlyra - jelentős lehet.

- ◆ A *növényzet szerkezetének megváltozása* főként a szubtrópusi térségben ér el nyugtalanító mértéket.
- ◆ E változások elsősorban a felszín fényvisszaverőképességét (albedóját) módosítják.
- ◆ A növényvel borított felszín annál kevesebb energiát ver vissza, annál többet nyel el és fordít az alsó légrétegek melegítésére - főleg a turbulens átkeveredés mechanizmusa útján - minél dúsabb a vegetáció és nedvesebb a talaj.



Csakhogyan ezekben az években az ember helytelen mezőgazdasággal, a felszaporodó állatállomány pedig a növényzet lelegetésével kizárja, hogy a szavannanövényzet tartósan fennmaradjon. A másik veszélyforrás a trópusi övben végbemenő nagyarányú, évente Belgium területének megfelelő mértékű *őserdőpusztítás*. Ennek elsődleges éghajlati következménye ugyancsak a hasznosított felszín nagyobb fényvisszaverő-képessége az erdőéhez képest. Például a trópusi erdők csak 15-20%-ot, míg a csupasz homok, szavanna körülbelül 35%-ot ver vissza. Globális átlagban az eddigi változások mértéke körülbelül  $-0,2 \text{ Wm}^{-2}$ , vagyis nem elhanyagolható mértékű a hűtő hatás.

- ◆ Egy további lehetséges hatás, *az antropogén hőtermelés* lokális következményei városi hőszigetelés néven régóta ismeretesek a meteorológiában.

A városok belterületén bizonyos időjárási helyzetekben több fokkal melegebb van, mint a peremkerületekben és ez a különbség hosszabb idő átlagában is megmutatkozik.

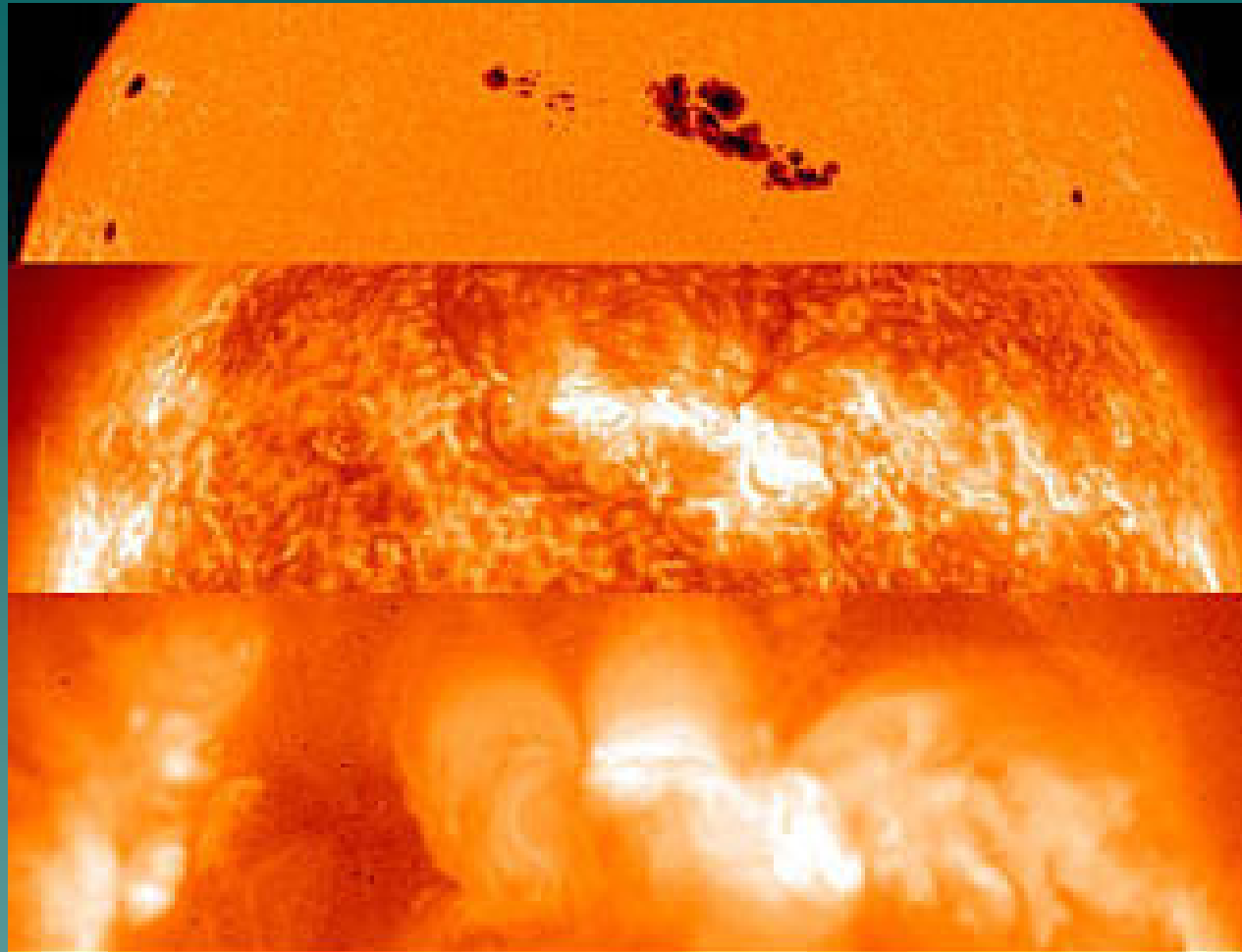
- ◆ Más meteorológiai elemekben is megfigyelhetők hasonló eltérések és - kedvező körülmények között - önálló zárt cirkuláció is kialakulhat. Jelenleg földi átlagban az antropogén hőtermelés mintegy  $10^{-4}$ -szerese a felszínen elnyelt napsugárzásnak, tehát ma még elhanyagolható mennyiség.

- ◆ Ugyanakkor bizonyos nagyvárosokban már megközelítik a földi átlagban elnyelt napsugárzást.
- ◆ Az antropogén hőtermelés jövőbeni alakulásának becslése szerint a teljes kibocsátás a század közepére akár egy nagyságrenddel is megnőhet.
- ◆ Ha ez a többlet hő egyenletesen oszlana el a Földön, akkor valószínűleg sem regionális, sem globális léptékben nem kellene jelentős hatásával számolni (az IPCC 2001. évi jelentése sem teszi).
- ◆ A hőforrások azonban az iparilag fejlett országokban koncentrálnak, de az erős koncentráltóság az általános légkörzés módosulását okozhatja, és a kérdéses régiókban az éghajlat lényeges módosulásához vezethet.



# Természetes éghajlati kényszerek

- ◆ A természetes éghajlati kényszerek az elmúlt évszázadokban befolyásolták a globális éghajlatot. Hatásuk azonban a feltételezett több fokos változások mellett egyre inkább másodlagossá válik.
- ◆ A *naptevékenység* a Nap sugárzásának időbeli ingadozását, esetleg lassú változásait jelenti, amely a látható sugárzás tartományában évtizedes időskálán 0,1%-os nagyságrendű.
- ◆ Számos statisztikai vizsgálat mutatott ki a különböző meteorológiai idősorokban olyan periodicitást, melyek a napsugárzás intenzitásában, illetve a Nap felszínén lejátszódó jelenségekben is megtalálhatók.
- ◆ Nem kevés vizsgálat ugyanakkor e periódusok hiányáról számol be. Ugyancsak kevésbé tisztázott a Napklíma kölcsönhatások fizikai mechanizmusának a kérdése.



**The multi-wavelength sun: visible, extreme ultraviolet, and x-ray light (top to bottom).**

SOHO/Yohkoh - March 29, 2001

- ◆ A napállandó fluktuációjának időszora, amelyben a néhány tized  $\text{Wm}^{-2}$  értékű, a Nap 11 éves ciklusát megjelenítő ingadozások valamelyest emelkedő trendbe (összesen  $+0,3 \text{ Wm}^{-2}$ ) csoportosulnak.

Ha e hipotézis igaznak bizonyul, akkor ez részben magyarázza századunk első felének pár tized fokos melegedését (amit eddig inkább az üvegházgázoknak tulajdonítottunk), másrészt néhány tized fokos hűtő hatást fejthet ki az elkövetkező évtizedekben.

- ◆ Egy-egy *vulkán* kitörése során kén-dioxid és más, főleg szilárd alkotórészek kerülnek a levegőbe, amelynek nyomán 1-3 év időtartam során sokszorosára nő a sztratoszférikus aeroszolernyő optikai vastagsága.
- ◆ Ehhez járul a kitörést követő hónapokban a még nagyobb optikai vastagságú vulkáni hamu is.
- ◆ Ez utóbbiak hetek alatt kiülepednek a légkörből, ám a kén-dioxid a sztratoszférában kisméretű kénsavcseppekké alakulva néhány évvel a kitörés utánig a sztratoszférában marad.

- ◆ vulkánkitörések elsődleges hatása a felszínre érkező rövidhullámú sugárzás gyengülésében jelentkezik.
- ◆ A sugárzási hatások eredményeként a felszín közelében csökken, a sztratoszférában (körülbelül 20 km magasságban) viszont emelkedik a hőmérséklet.
- ◆ A legutóbbi nagy erejű kitörés (Mt. Pinatubo, 1991. június) például - az El Chichon 1982. évi kitöréséhez hasonlóan - a vártnál kisebb, csupán 0,2 °C-os csökkenést hozott a globális hőmérsékletben.
- ◆ A vulkánmentes időszaknak ugyanakkor néhány tized fokkal magasabb átlaghőmérséklet felel meg.
- ◆ A vulkánosság tehát, mint időben szporadikus hatás, hosszabb idő átlagában kevésbé befolyásolja majd a jövő éghajlatát.

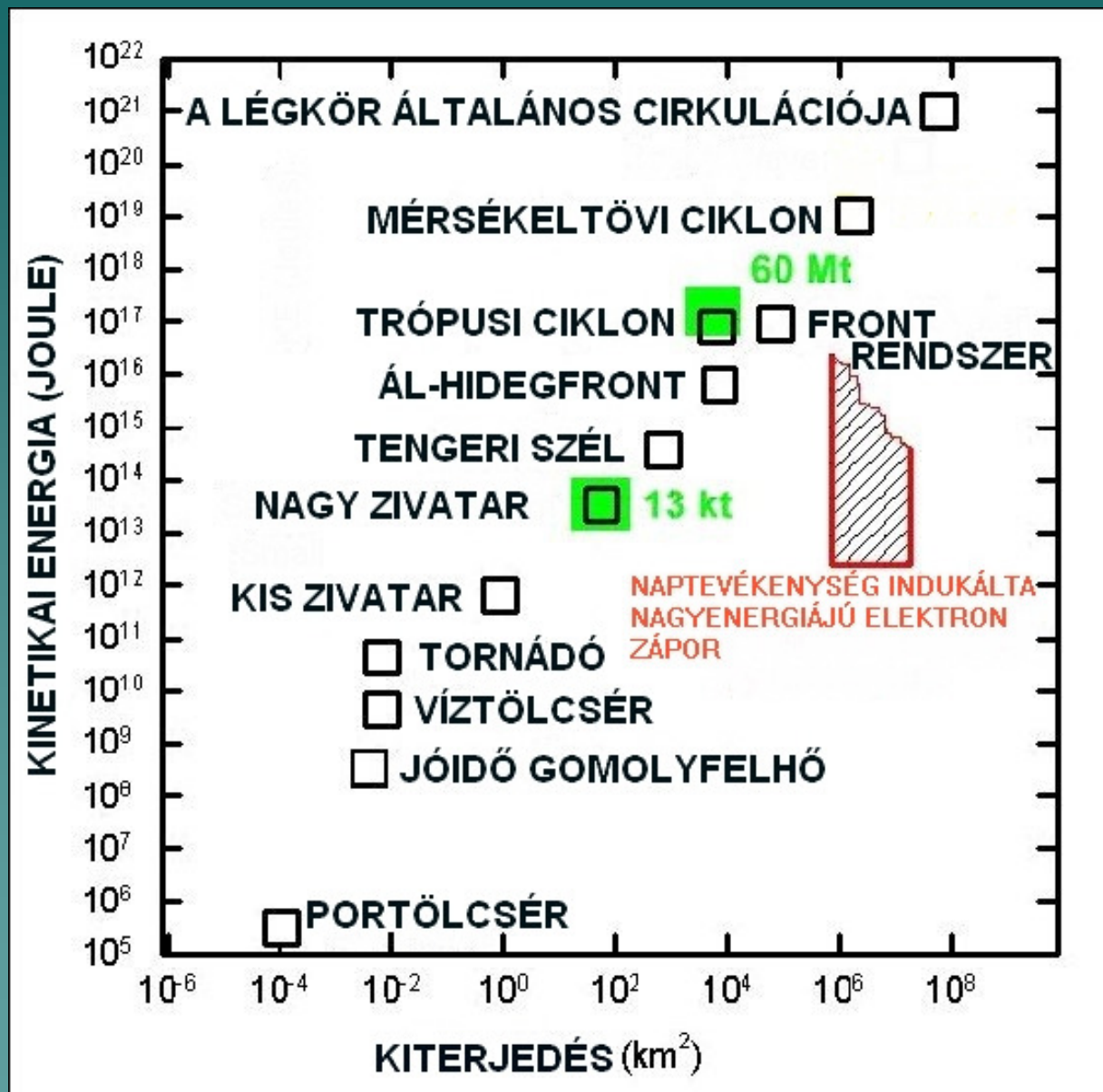
## A Mt. Pinatubo (Fülöp-szk.) kitörése, 1991



## Az éghajlati rendszer belső változékonysága

- ◆ A légkör, a szárazföldek, az óceánok, a bioszféra és a szilárd víz (krioszféra) alkotta éghajlati rendszer egyike a valaha modellezett legbonyolultabb, nem lineáris rendszereknek.
- ◆ A rendszer fontos méretskálái térben a felhőfizikai folyamatok milliméteres léptékétől az Egyenlítő hosszáig; időben a másodpercnyi élettartamú mikroturbulenciától a sok száz éves óceáni vízkörzésig tartanak.
- ◆ Mindezt ma még egyetlen modell sem képes egymaga figyelembe venni.
- ◆ E rendszerben, amit - még korlátozott felbontással, de immár minden részrendszerére kiterjedően - képesek vagyunk számítógépben modellezni, bizonyos változékonyság minden külső kényszer nélkül is ki tud alakulni.

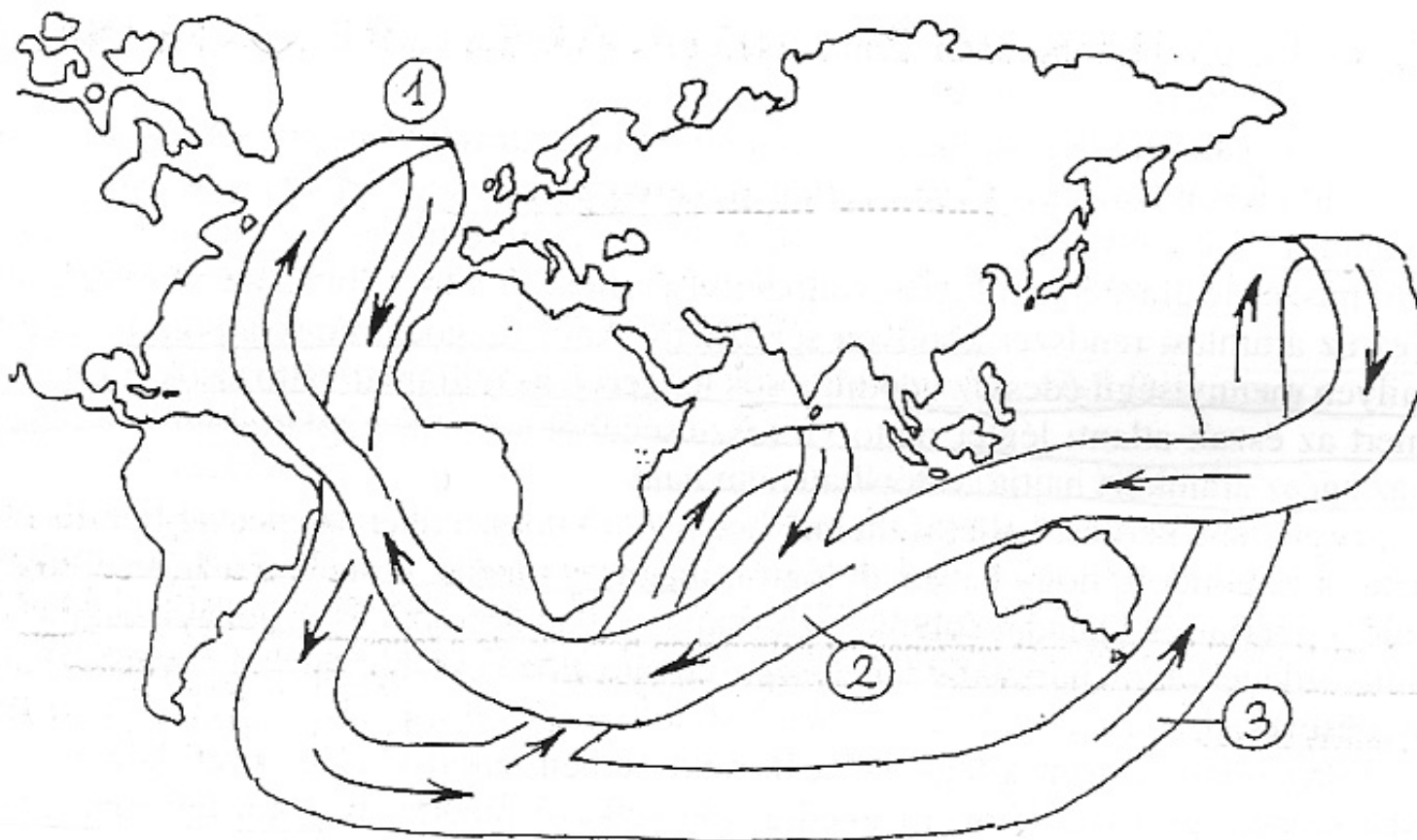
# Különböző légköri jelenségek kiterjedése és energiája



# Feltételezett katasztrófa-ugrások

- ◆ Szólnunk kell két olyan hipotézisről, amelyekre nézve ma még tapasztalati eredményekkel is alig rendelkezünk. Az *egyik* szerint Földünk éghajlata egy nagyobb változás esetén közel kerülne egy kritikus elágazási ponthoz, amelyből a további melegedés már a maitól gyökeresen különböző klímába fordulna át. E feltételezett katasztrófaugrás a kezdeti klímamodellek szerint két módon realizálódhatna.
- ◆ Az egyik lehetőség akkor lépne fel, ha az óceánok függőleges síkú körforgásának, *az óceáni szállítószalagnak* mai rendszere lefékeződne, vagy hirtelen átalakulna.
- ◆ Ekkor ugyanis legyengülne a földrajzi szélességek közötti energiacsere, ami bizonyítottan utoljára a tízezer évvel ezelőtt, a mainál hidegebb klímájú évtizedekben fordult elő.





A "Broecker Conveyor" elnevezésű globális tengeráramlás szimbolikus képe: (1) Koncentrált vízszüllyedési körzet az Atlanti Óceán északi részén (Broecker szerint lényegében ez hajtja a jelenlegi globális vízkörzési rendszert); (2) meleg felszíni áramlás; (3) hideg mélyvízi áramlás.

Ekkor a földi klíma néhány évtized alatt több fokos ingásokat produkált, ami egy nagyságrenddel gyorsabb változást jelentene (mindkét irányban!), mint amire az üvegházgázok miatt számítanunk kell. Előfordulhat tehát, hogy a kezdeti kis melegedést hirtelen erős lehűlés, vagy hirtelen felmelegedés követné, vagyis teljesen prognosztizálhatatlanná válna a klíma. E szállítószalag fő motorja a sókoncentrációk különbsége az egyenlítői, illetve a sarkvidékeken. Márpedig a melegedés folyamatában megtörténhet (több, egyelőre a fontos léptékek egy részét az óceánban sem tartalmazó modell szerint várhatóan be is következik), hogy ez a különbség lecsökken. Ez maga után vonná a kiegyenlítődes lelassulását is.

- ◆ *A másik* minőségi ugrás akkor következhet be, ha az északi félgömb tengeri jégtakarója teljesen elolvad, amire utoljára 4 millió évvel ezelőtt, a mainál 4-5 °C-kal magasabb globális átlaghőmérsékleten volt példa.
- ◆ Az sem zárható ki teljesen, hogy a várható felmelegedés miatt a távolabbi jövőben a nyugat-antarktiszi jégtáblát a tenger alatt rögzítő kapcsolat elvékonyodhat, ami azzal jár, hogy a jéghátság az áramlatokkal az alacsonyabb szélességek felé sodródva végül is elolvad.

- ◆ Ez az 5-7 méter szintemelkedéssel járó olvadás azonban mai ismereteink szerint lassú, így e katasztrófától a következő száz évben talán még nem kell tartanunk.
- ◆ A fenti katasztrófafenyegetések ellentettje a *GAIA-hipotézis*, amely szerint a Föld élő szervezetei képesek lennének a globális környezetet s benne az éghajlatot bármely erős éghajlati kényszerekkel szemben is a fejlődésükhöz szükséges optimális állapotban tartani.
- ◆ A legfőbb ellenvetés e hipotézissel kapcsolatban az lehet, hogy az eddig talált bio- és geofizikai önszabályozó *mechanizmusok vagy túlságosan lassúak az üvegházhatás várható erősödéséhez képest* (például a tengerfenéki mészkőképződés fokozódása), *vagy nem eléggé intenzívek a melegedés ellensúlyozásához* (például az óceáni élővilág reakciója).
- ◆ Ne feledjük: *a földtörténetben valószínűleg egyedülálló ütemű* (ha nem is egyedülálló mértékű) *klímaváltozásról van szó!*

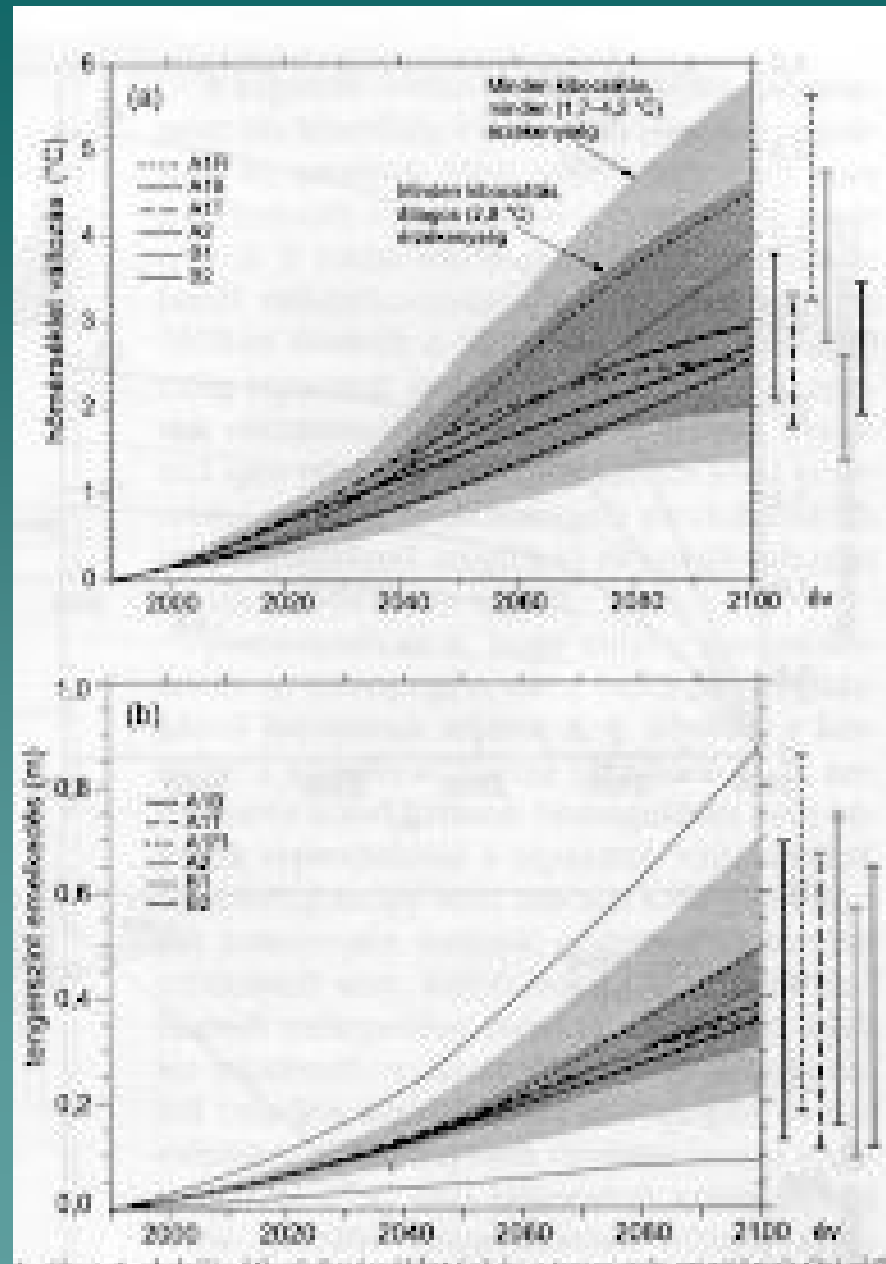
# Az éghajlat előrejelzése: Globális forgatókönyvek

- ◆ A globális klímaváltozásról szóló mennyiségi előrejelzések (IPCC, 2001) ma még csak a fenti katasztrófától mentes mennyiségi változásokat tudják számszerűsíteni.
- ◆ A figyelembe vett külső tényezők felölelik az üvegházgázokat (beleértve az ózont), a szulfát- és a széntartalmú aeroszolok direkt hatását, míg a többi fenti - igen bizonytalanul prognosztizálható, illetve jórészt regionálisan nagyon különböző - hatótényezőt figyelmen kívül hagyják.
- ◆ Az így keletkező alternatív globális prognózisok (forgatókönyvek, -scenáriók) alapvetően két ok miatt különböznek.

- ◆ Az egyik a légkör összetételének jövőbeni forgatókönyvei, amelyeket az IPCC legújabb átfogó jelentése összesen 11 lehetséges forgatókönyvbe sorolt.
- ◆ A legkedvezőbbtől a legerősebb antropogén hatásokig e forgatókönyvek szerint igen széles sávban változnának. Például a szén-dioxid koncentráció előrebecsült értéktartománya 540 és 970 ppm közé esik.
- ◆ E tényezők és forgatókönyvek 2100-ra 4 és 9 Wm<sup>-2</sup> közötti elsődleges sugárzási mérlegváltozással számolnak. (A korábbi Második Helyzetértékelő Jelentés szerint ezek a számok 4 és 8 Wm<sup>-2</sup> szélső értékeket mutatták, vagyis az öt évvel ezelőtti, teljesen más kibocsátási forgatókönyvek is hasonló eredményt adtak.)

- ◆ Tudatos korlátozó intézkedéssel a prognózisok csak a CFC-kibocsátásnak a Montreali Jegyzőkönyvet (1987) követően, részben már meg is valósult csökkenése terén számoltak, ami a sugárzási hatásokat évszázadunk kezdetén  $0,3 \text{ Wm}^{-2}$ , a század végére  $0,1 \text{ Wm}^{-2}$  mértékéig csökkentené.
- ◆ A másik tényező az éghajlat külső hatásokkal szembeni érzékenysége. Ezt a klímamodellezés kezdetei óta a szén-dioxid koncentráció feltételezett megkétszereződése, mint állandósult állapot hatására létrejövő, egyensúlyi hőmérsékletváltozás mértékével szokás jellemezni.

A globális átlaghőmérséklet (a) és a tengervíz szintjének (b) előrejelzett változásai, amelyek széles sávokat képeznek az üvegházhatás erősödésének legújabb (A1B-B2), illetve korábbi (IS92c-e) alternatíváiban,



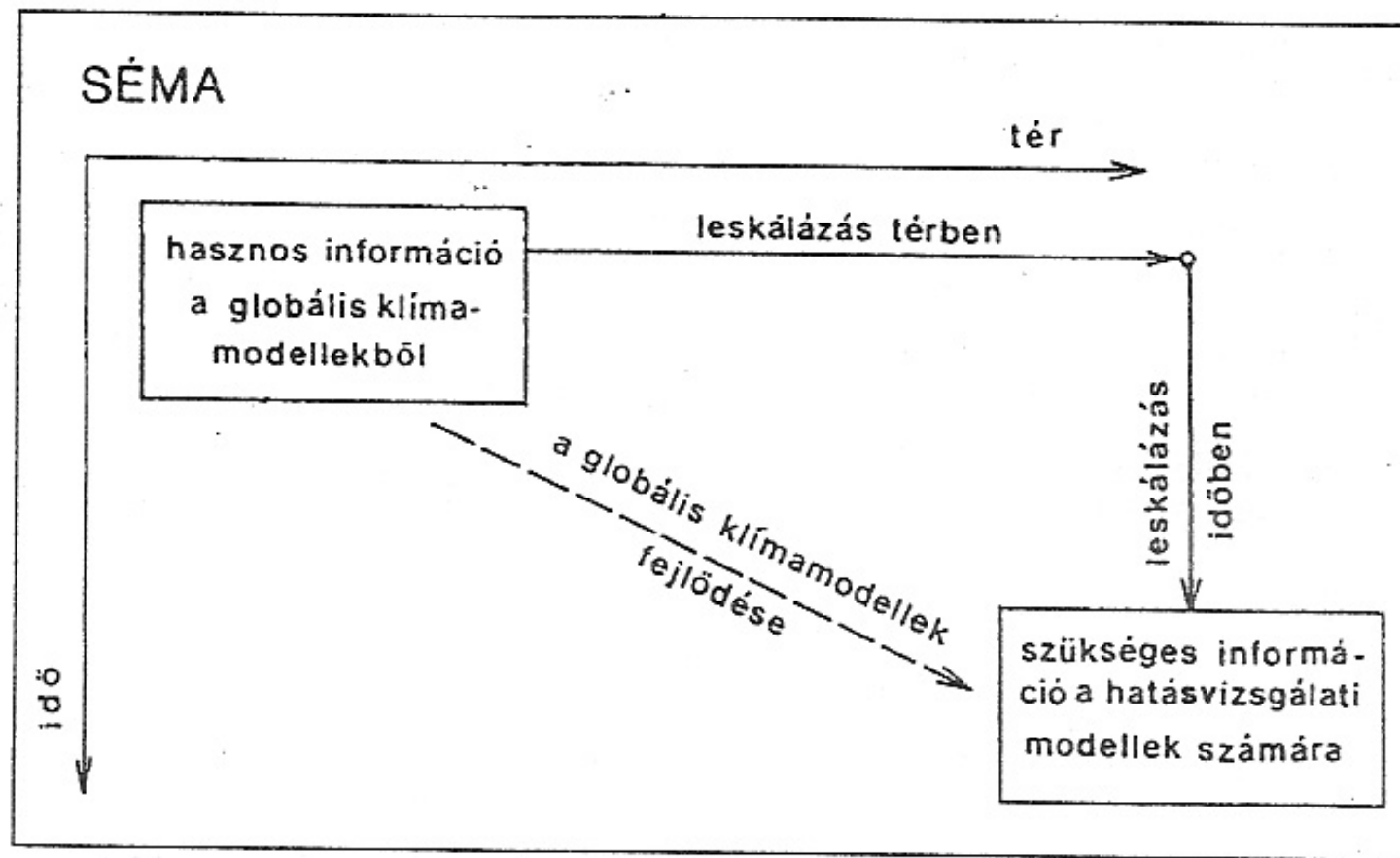
- ◆ Az így meghatározott érték a kiválasztott, legjellemzőbb hat klímamodellben 1,7 és 4,2 °C között változik. A legkedvezőbb esetben az előrejelzett változás csak 1,4 °C-os lenne a jövő század végéig, de ha minden rosszul alakul, akkor ez 5,8 °C is lehet. A korábbi, Második Helyzetértékelő Jelentés a 21. század végére ennél kisebb melegedéssel számolt.
- ◆ A prognózis főként a sokféle aeroszolhatás felismerése miatt vált meredekebbé, aminek eredményeként az aeroszokok hűtő ("antiüvegház") hatása kevésbé egyértelmű.



- ◆ A forgatókönyvek előállítása azért képez tudományos feladatot, mert a globális és kontinentális skálán hasonlóan viselkedő, s emiatt hitelt érdemlő, kapcsolt óceán-légkör általános cirkulációs modellek válasza e kisebb léptékekben már nem megbízható.
- ◆ A fokozatos felmelegedést is szimulálni képes, kapcsolt óceán-légkör modellek névleges felbontása is csak mintegy 250 km, míg a tényleges felbontás, vagyis a valóságban kirajzolt, legkisebb objektum mérete ennek legalább négyszerese.
- ◆ Ez azt jelenti, hogy olyan alapvető csapadékhordozó képződmények, mint például a műholdképeken szabad szemmel is azonnal elkülönülő, időjárási frontok csak hosszanti méretük szerint elég nagyok: több száz kilométeres szélességükből a modell rácshálózata csak szerencsés elhelyezkedés esetén vesz "észre" valamit.

- ◆ A korlátozott felbontás tehát elsősorban nem azért baj, mert a kinyerhető információ térben nem elég sűrű, hanem azért, mert maguk a rácsponti értékek is torzítottak.
- ◆ A különböző modellekben (azonos külső kényszerek mellett) a hőmérséklet-változások térbeli hasonlósága kielégítő.
- ◆ A korrelációs együttható, amelyik megmutatja, hogy a változások területi eloszlása mennyire hasonló a modell párok többségében legalább 95%-os, néhány esetben 99%-os szinten szignifikáns.
- ◆ A csapadékváltozások, amelyeknél még fontosabbak a modellekben még nem szereplő kisebb léptékű, például felhőfizikai folyamatok, ugyanakkor alig hasonlítanak egymásra a különböző modellekben!

- ◆ A globális modellek lehetőségei és a hatásvizsgálatok igényei közötti különbséget napjainkban a modellválaszok *leskálázásával* szokás áthidalni.
- ◆ Ez az eljárás kapcsolatot teremt a globális klímamodellek megbízható, körülbelül kontinensnyi térbeli és évszakos időbeli léptékű skálái, illetve a hatásvizsgálati modellezés számára szükséges néhány ezer km<sup>2</sup>-es, általában napi adatsorok között.
- ◆ Ez a leskálázás azonban nem biztos, hogy egyenértékűen helyettesíti a fizikai folyamatok explicit modellezését.
- ◆ A klímaváltozás helyi hidrológiai, ökológiai stb. következményeinek becsléséhez és az esetleges alkalmazkodási stratégiákhoz viszont mindenképpen szükség van a modellek lehetőségeinél ma még sokkal finomabb térbeli és időbeli bontású adatokra.
- ◆ Ezért a leskálázást és annak eredményeit - az egzakt ellenőrzés lehetőségének hiányában is - széles körben használják, szerte a világon.



*A globális klímamodellek eredmény-mezőinek tér- és időbeni leskálázása*

- ◆ A leskálázás legkomplikáltabb módja a beágyazott fizikai modellezés, amelynek során a Föld területének egy kitüntetett fontosságú részén (például Európában) egy sokkal finomabb légköri fizikai modellt ágyaznak be egyoldalúan a háttérmodellbe.
- ◆ Ekkor a finomabb modell oldalsó határfeltételeit a háttérmodell szolgáltatja, s a belső fizikai részleteket a sokkal jobb (10 km körüli) felbontású modell állítja elő anélkül, hogy a futási eredmények - ellentétben a valósággal - visszahatnának a nagytérségít folyamatokra.
- ◆ A térbeli leskálázás statisztikai eljárásaiban meg kell különböztetni a kis változások (<1 °C globális melegedésig terjedő) tartományát, amelyen a viszonylagos adatbőség lehetővé teszi a térbeli léptékek közötti közvetlen kapcsolatkeresést.
- ◆ Az ennél nagyobb változások tartományán a közvetlen összevetésre csupán a melegedés mértékében ugyan megfelelő, de teljesen más okok miatt kialakult, paleoklíma-analóg időszakokban van mód.

- ◆ A leskálázás során emiatt olyan szintetikus eljárásokra kényszerülünk, mint a cirkulációs típusok gyakoriságának kombinálása feltételes éghajlati paraméterekkel.
- ◆ A térbeli leskálázás csak korlátozott (például évszakos) időbeli bontású becsléseket nyújthat, mert a kapcsolatok jel/zaj aránya a rövidebb időskálákon egyre kedvezőtlenebb; a modellek cirkulációs sorozata napi bontásban pedig több, mint kétséges.
- ◆ Az éghajlati forgatókönyvek hatásvizsgálati alkalmazása érdekében ezért *időbeli leskálázásra* is szükség van. E feladat két fázisa a magasabb statisztikus momentumok módosulásának (a "változékonyság változásának") becslése és a finomabb (általában napi) bontású helyi adatsor statisztikus generálása.

A forgatókönyvek bizonytalanságának fő összetevői a következők:

- ◆ pontatlanul jelezhető előre a gázok jövőbeli légköri mennyiségének növekedési üteme;
- ◆ nem ismerjük eléggé pontosan az aeroszolok - elsősorban indirekt - hatását;
- ◆ nem tudjuk pontosan, hogy miként változik a meleget erősítő, pozitív visszacsatolást képviselő vízgőz mennyisége a légkörben, illetve hogyan alakul a felhőzet mennyisége, amelynek ellentétes előjelű sugárzási hatása részben ellensúlyozhatja a melegedés mértékét;
- ◆ nem ismerjük kellő pontossággal az óceán és a légkör, valamint az óceán felső és mélyebb rétegei között végbemenő energiacsere mértékét, pedig e tényezők is szabályozzák az éghajlat változásának ütemét és területi eloszlását stb.