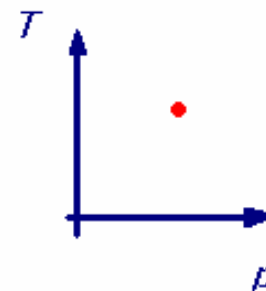




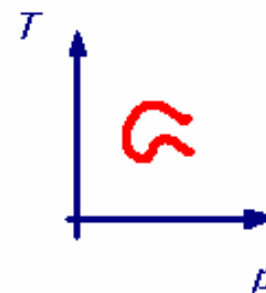
Idő

- A légkör jellemzőinek egy adott pillanatban mért állapota



Időjárás

- A légkör (főként a *troposféra*) paramétereinek rövidtávon bekövetkezett változásai



Klíma (éghajlat)

- Az éghajlati rendszer (légkör és a vele érintkező geoszférák együttese) hosszú idő alatt (20-30 év) tanúsított szokásos viselkedése



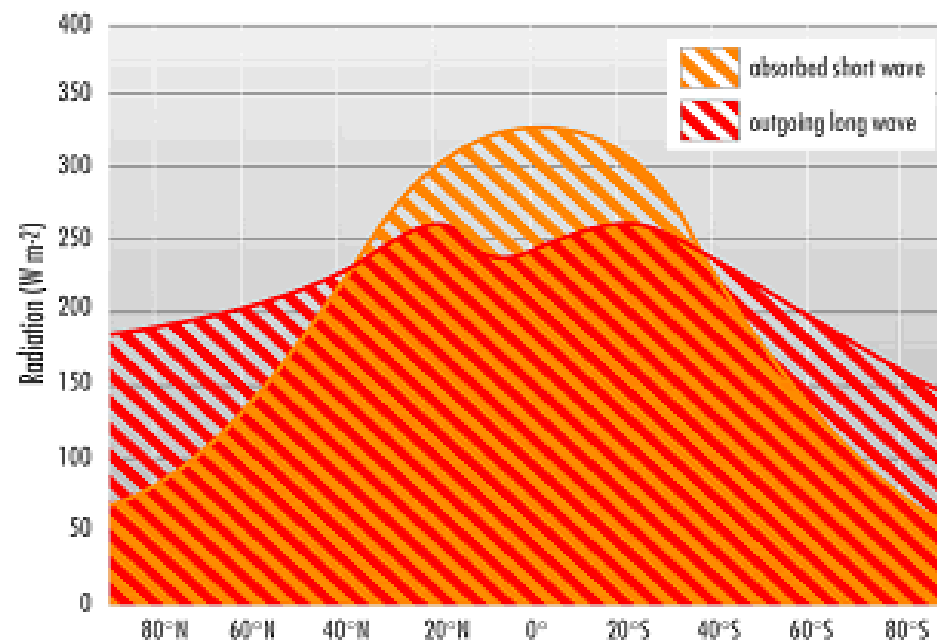
Az éghajlati rendszer elemei

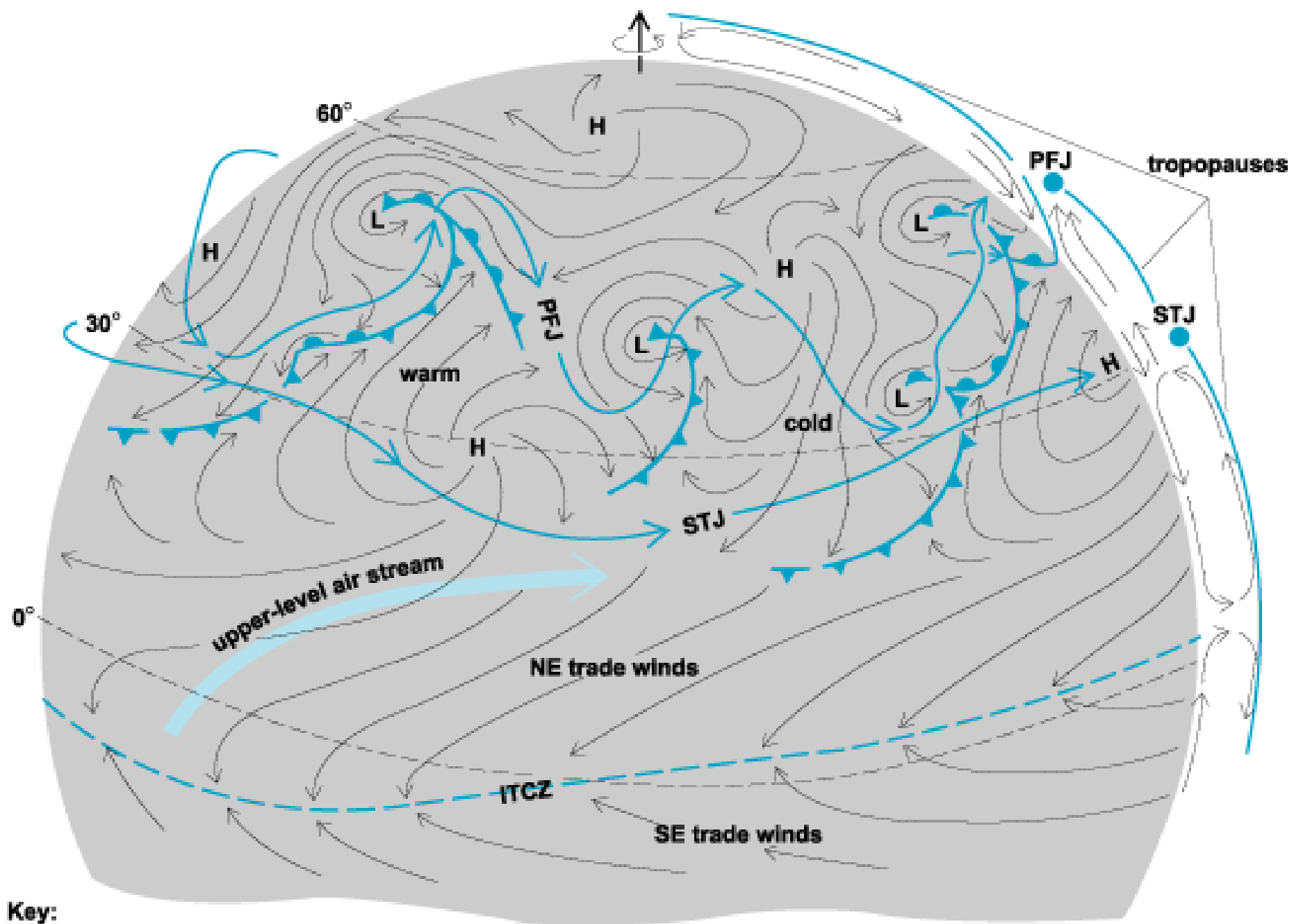
- **Éghajlati rendszer:** a légkör és a vele érintkezésben álló négy geoszféra (hidroszféra, krioszféra, kontinentális felszín és bioszféra) kölcsönhatásban álló együttese
- **Légkör:** az éghajlati rendszer központi komponense, annak leginkább instabil és legnagyobb változékonyságot mutató része
 - Állandó koncentrációjú gázok (N_2 , O_2 , Ar)
 - Változó térfogatú gázok (CO_2 , CH_4 , O_3)
 - Állandóan változó térfogatú gázok (CO, vízgőz)
 - Szilárd és cseppfolyós részecskék (mind a beérkező, mind a kimenő sugárzásátvitellel bonyolult és térben erősen változó kölcsönhatásban állnak)

Az éghajlati rendszer elemei

- A légkör hőerőgépként működik, amely a meridionális irány mentén eltérő intenzitással érkező szoláris hőt a levegő különböző skálájú mozgásainak kinetikus energiájává alakítja át.
- Ezeknek a mozgásoknak az együttese, az **általános légkörzés** bonyolítja le az *impulzusnak, a hőnek, a légtömegnek és a víznek* azt a térbeli átvitelét, amely az éghajlati állapotnak korlátos jelleget biztosít: a Föld egyetlen pontján sem alakul ki progresszív (tartósan egyirányú) változás.

Az éghajlati rendszer elemei





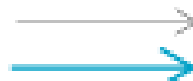
Key:



cold front



warm front



airflow at Earth's surface



jet streams

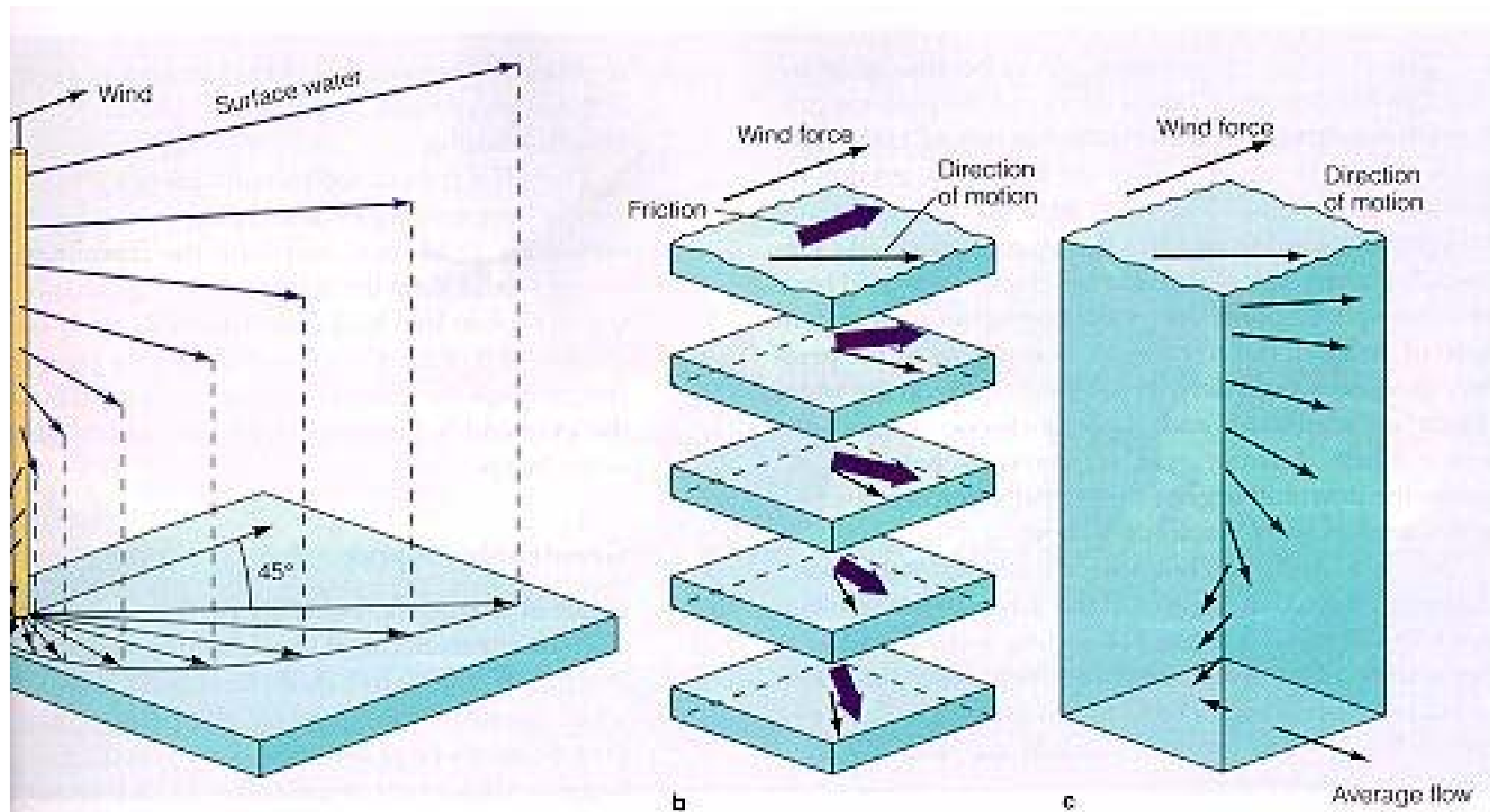
H high-pressure center

L low-pressure center

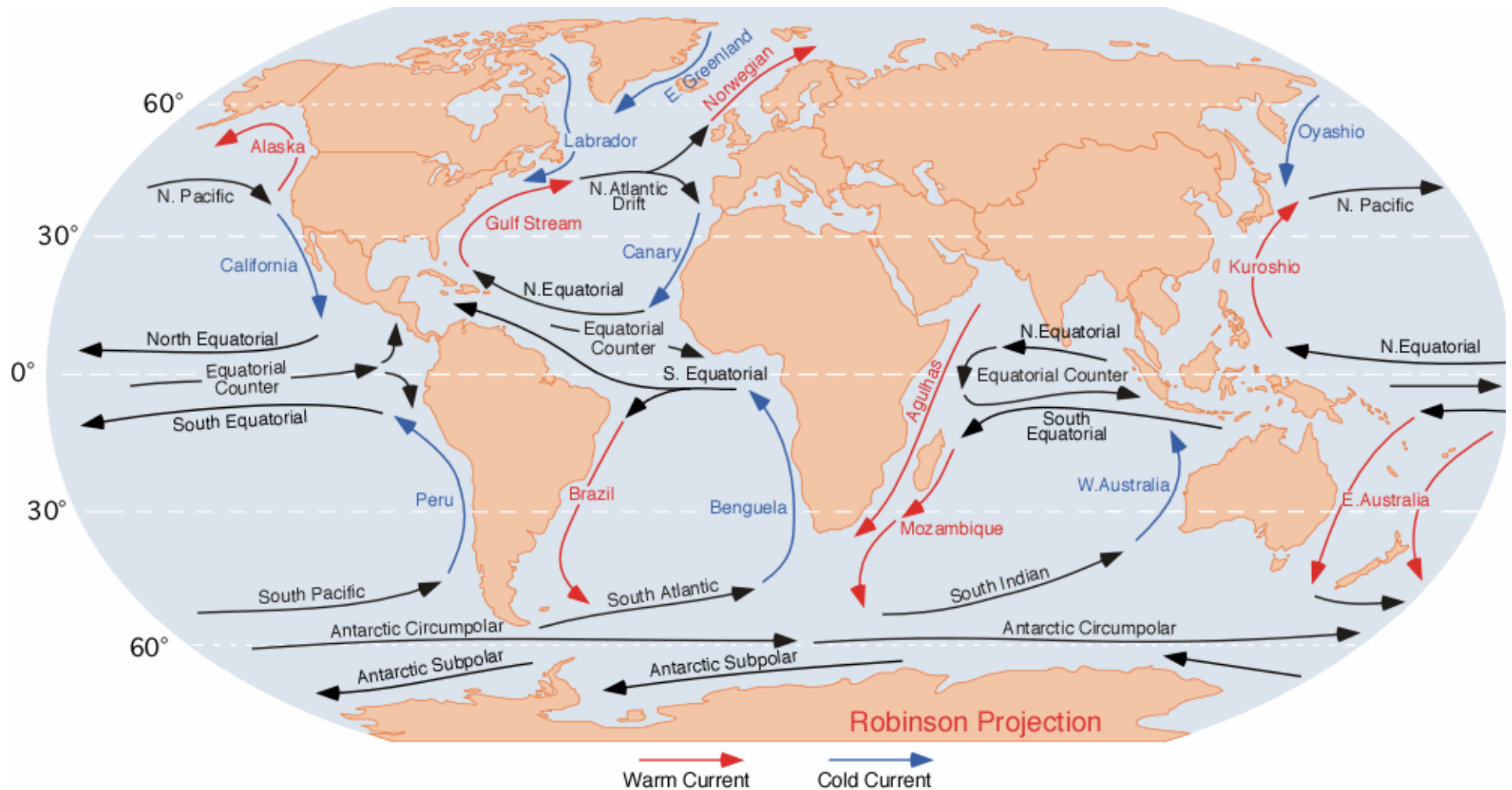
Az éghajlati rendszer elemei

- **Hidroszféra:** az összes felszíni és felszín alatti víz
- Az óceánok a Föld felszínének $\sim 71\%$ -át borítják, nagy hőkapacitás (hatalmas energiát tárolnak) és tehetetlenség jellemzi
- Két alapvető mozgásforma jellemzi vízkörzését:
 - Ekman-sodrás (ennek egyik szakasza a Golf-áramlás); a légköri cirkuláció mozgatja) (400 m-ig, 10%-a a teljes óceáni víznek)
 - Termohalin cirkuláció (a tengervíz hőmérsékletének és sótartalmának meridionális gradiense; az Atlanti- és a Csendes-óceán felszíni sótartamának asszimmetriája tart fenn)
- A világméretű „óceáni szállítószalag” szintén részese a globális energiaegyensúly kialakításának

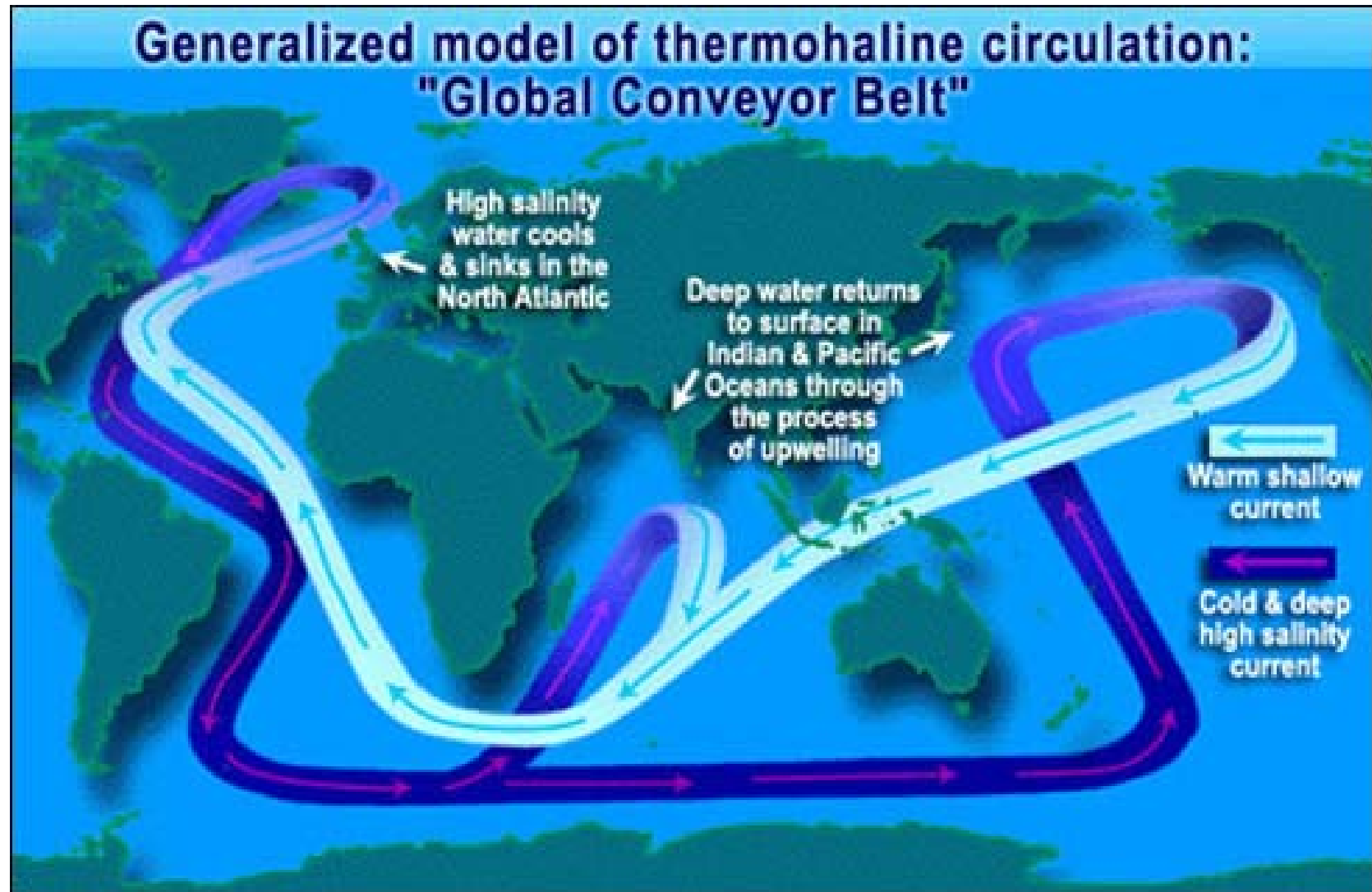
Ekman-sodrás



Tengeráramlatok rendszere



Az óceáni szállítószalag



Az éghajlati rendszer elemei

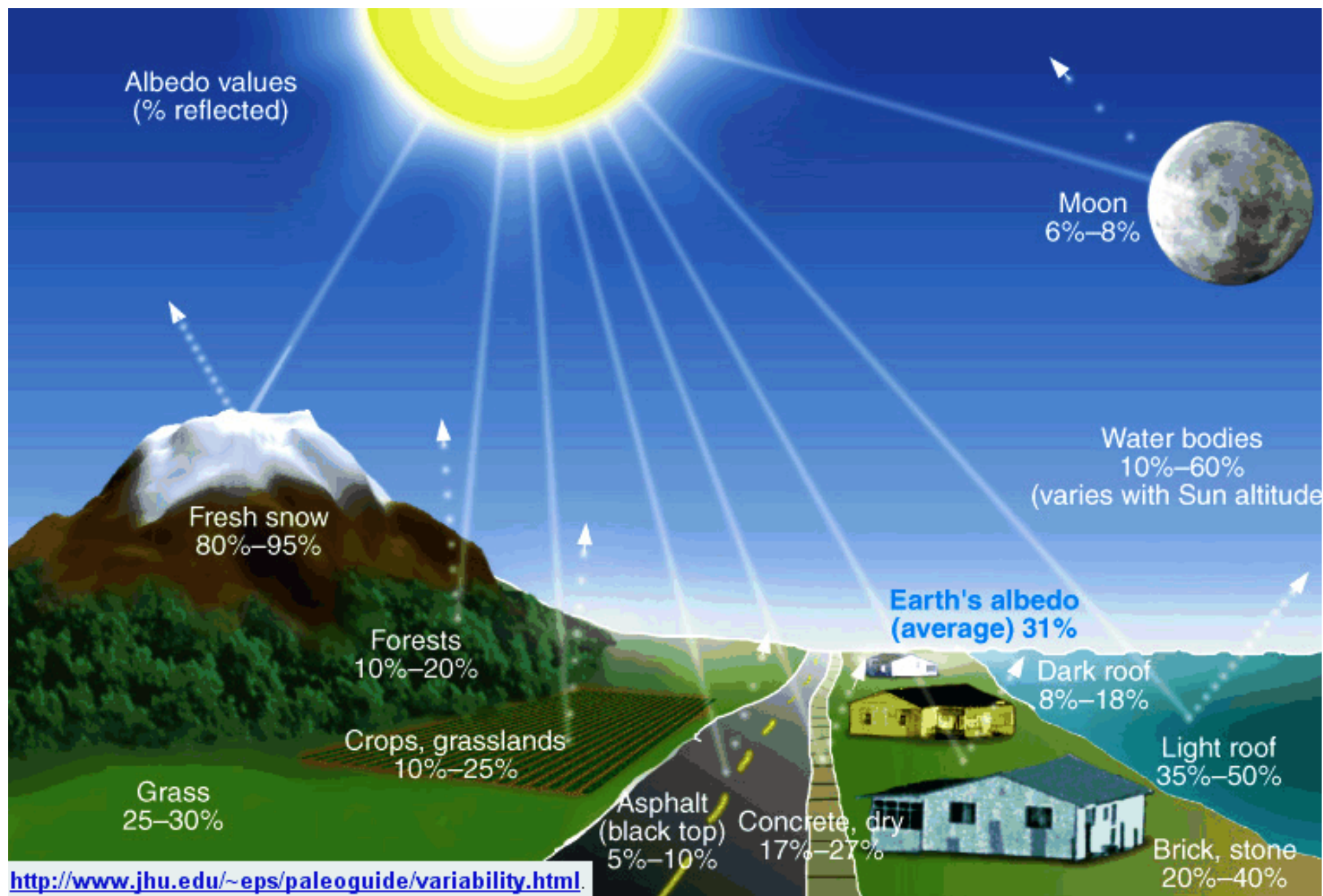
- Az óceánok szén-dioxid nyelők (~korlátlan tároló lehetne, de a felsőbb és a mélyebb rétegek között lassú a keveredés)
- A becslések szerint a világtenger jelenleg évente $1,9 \times 10^{15}$ g szénrel egyenértékű szén-dioxidot vesz fel, ami a fosszilis tüzelőanyagok elégetéséből származó antropogén légköri szén-dioxid kibocsátás mértékének jelenleg közel 30%-a
- A tengeri üledék oxigén-izotópos vizsgálata lehetőséget nyújt többszázezer évvel ezelőtti idők hőmérsékleti viszonyainak a feltárására.

Az éghajlati rendszer elemei

- **Krioszféra:** sarki jégmezők, gleccserek, felszíni hó, tengerjég
 - A Föld édesvíz-készletének 80%-át tartalmazzák
 - Beérkező sugárzás visszaverése
 - Nagy a termikus tehetetlensége, alacsony a hővezető képessége
 - Mélytengeri cirkuláció kormányzása
- A jégmezők mélyebb rétegeibe záródott levegőbuborékok kémiai analízise régmúlt korok légkörének összetételét tárja elénk, a jégben levő oxigénizotópok (^{18}O és ^{16}O) aránya pedig az összetételhez tartozó hőmérsékletet adja meg.

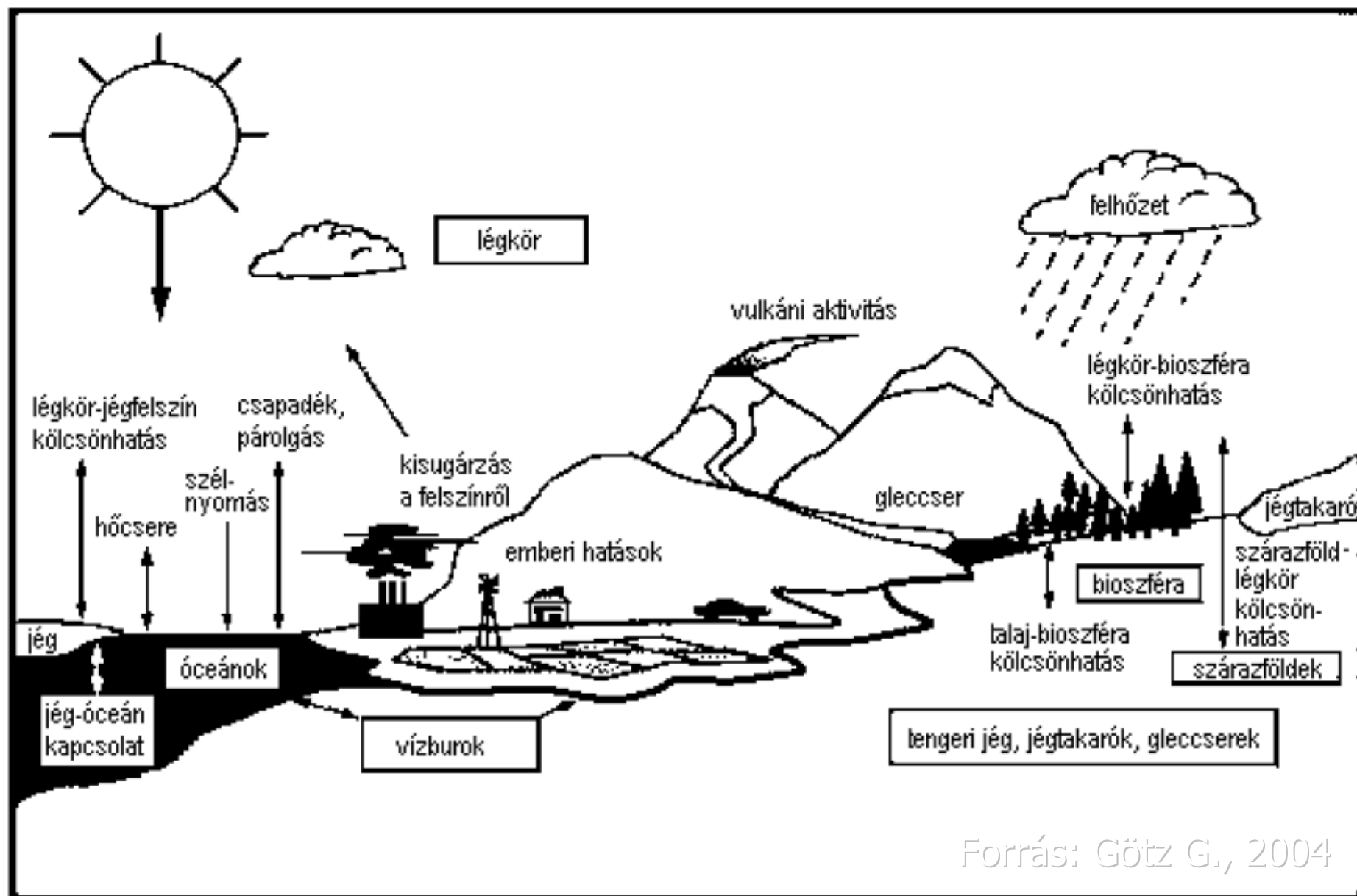
Az éghajlati rendszer elemei

- Kontinentális felszín
 - Vegetáció és talajfelszín hatása (albedó)
 - Érdesség
 - Aeroszokok forrása
- Bioszféra: az élet színtere a Földön
 - Növényi populáció (tenger és szárazföld)
 - Befolyásolja az üvegházgázok biokémiai körforgalmát
 - A légkör hatása a flórára fosszíliákként, fák évgyűrűiként és pollenmaradványokként őrződik meg, és igen sok ismeret, amivel az elmúlt korok éghajlatáról rendelkezünk, ilyen biotikus indikátorok nyomán került napvilágra.



Az éghajlati rendszer elemei

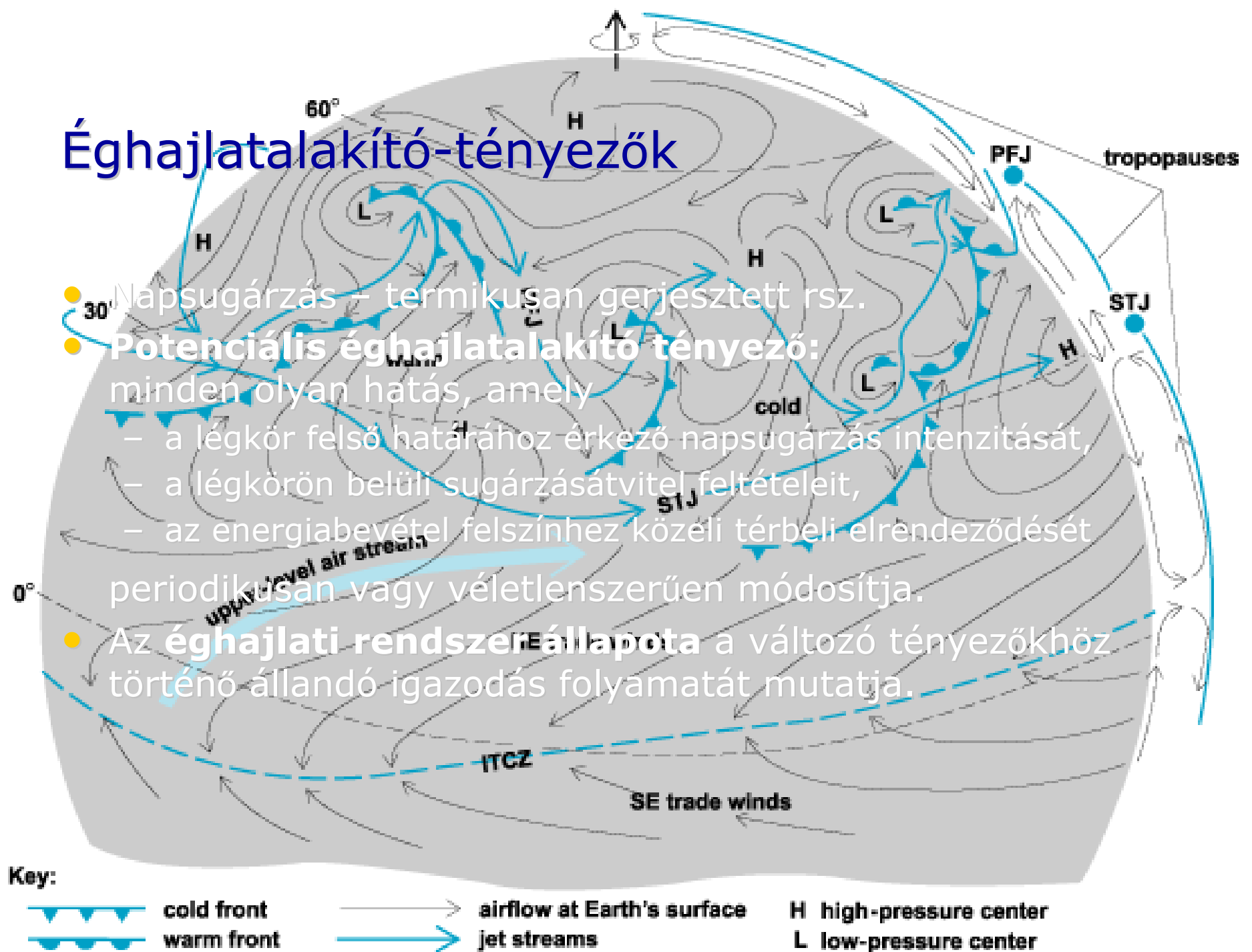
- A felszíni geoszféráknak léteznek elemei, amelyek meteorológiai kontextusban nem lépnek kölcsönhatásba a környezetükkel. Ilyen például a domborzat, amely mindig egyirányú hatást fejt ki a légkör viselkedésére.
- Ugyanebből a megfontolásból klasszikus értelemben nem tekintjük a bioszféra részének sem a faunát, sem az emberiséget
- **DE! az emberi tevékenység** napjainkra a figyelem középpontjába került **éghajlatalakító-tényező rangjára emelkedett.**



Forrás: Götz G., 2004

Éghajlatalakító-tényezők

- Napsugárzás – termikusan gerjesztett rsz.
- **Potenciális éghajlatalakító tényező:** minden olyan hatás, amely
 - a légkör felső határához érkező napsugárzás intenzitását,
 - a légkörön belüli sugárzásátvitel feltételeit,
 - az energiabevétel felszínhez közeli térbeli elrendeződésétperiodikusan vagy véletlenszerűen módosítja.
- Az **éghajlati rendszer állapota** a változó tényezőkhez történő állandó igazodás folyamatát mutatja.



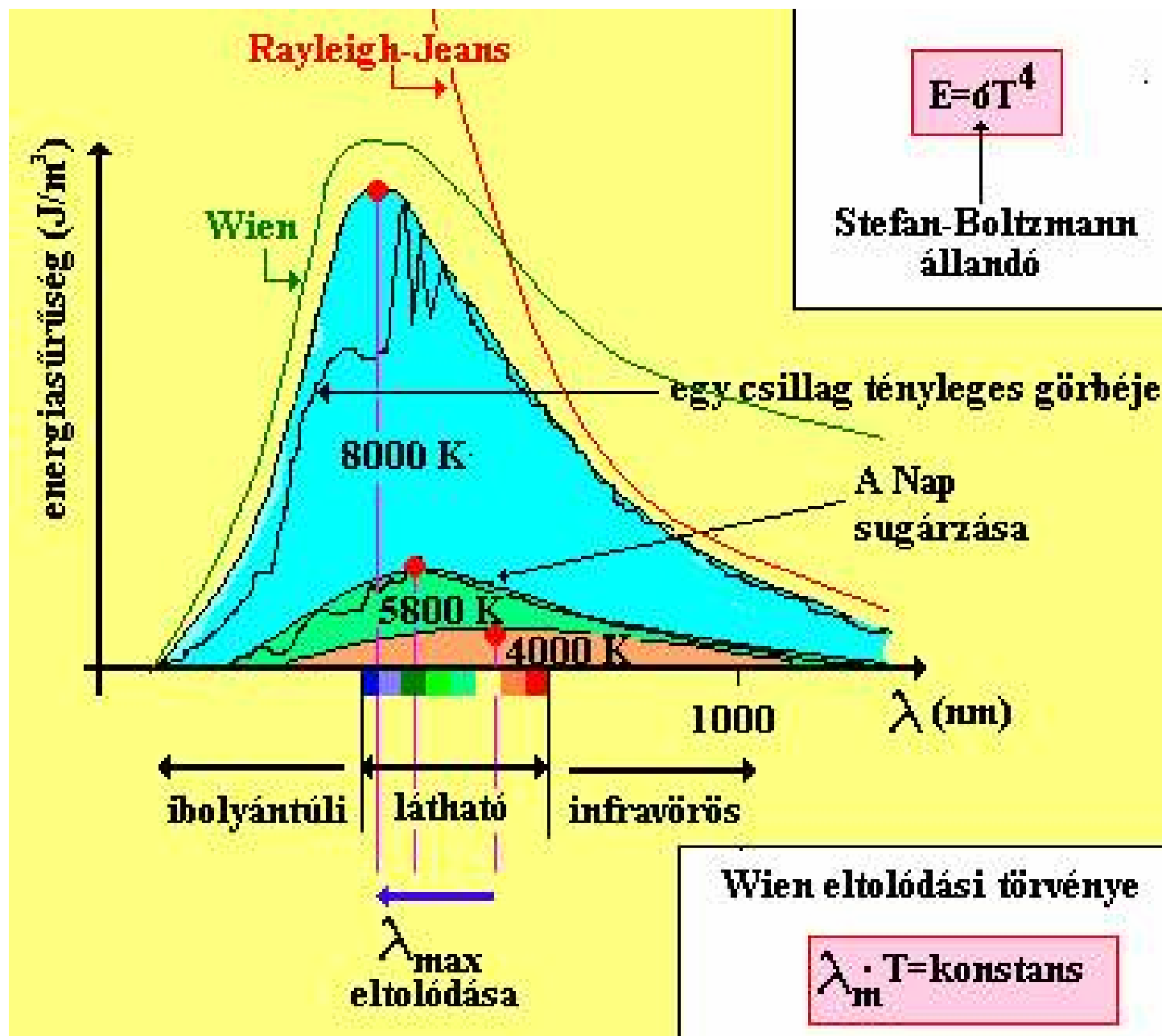
Éghajlatalakító-tényezők

- **Wien-féle eltolódási törvény:**
az absz. fekete test hőm-i sug-ának színeképében a T hőm-en a max. intenzitásnak megfelelő hullámhossz. és a T absz. hőm. fordítottan arányosak

$$\lambda_{\max} = \frac{a}{T}$$

$a \sim 2880 \text{ mmK}$

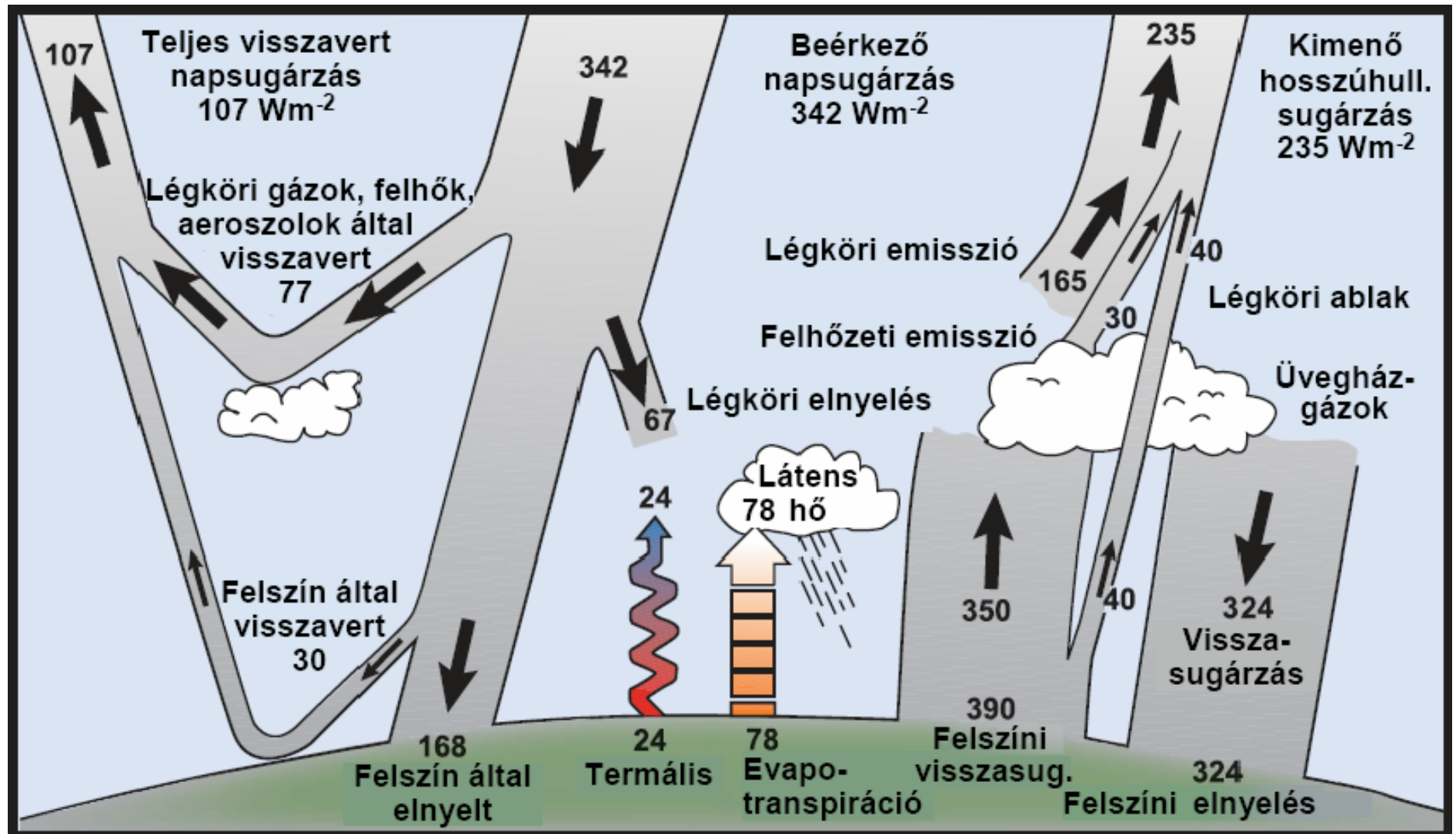
- **Napállandó:**
a főként $0,15 \text{ }\mu\text{m}$ -tól $4,0 \text{ }\mu\text{m}$ -ig terjedő hullámhossztartományba eső, maximális intenzitását $0,47 \text{ }\mu\text{m}$ körül elérő napsugárzásból a légkör felső határának egységnyi felületére merőlegesen érkező átlagos hőáramsűrűség. Értéke jelenleg 1370 Wm^{-2} körül van.



Éghajlatalakító-tényezők

- A Nap sugárzásából a szferikus felszín minden m^2 -ére: **$1370/4 = 342 \text{ W}$** energia jut.
- Ennek az energiának a **31%**-át a légkör, a felhőzet és a földfelszín azonnal visszaveri az űrbe
- a rendszerben maradó hányad (235 Wm^{-2}) egy részét a légkör nyeli el, többsége (168 Wm^{-2} , a beérkező napsugárzás **49%**-a) a Föld felszínét melegíti.
- A felszín ezt a hőt a látható fény hullámhosszánál nagyobb hullámhosszúságú **infravörös sugárzás, érzékelhető hő** és a vízgőz kondenzációja során felszabaduló **látens hő** formájában juttatja vissza a légkörbe.
- A Föld felszíne és a légkör között lebonyolódó energiacsere a globális felszíni középhőmérsékletet jelenleg $\sim 14,5^\circ\text{C}$ -os értéken tartja. Ez az érték a magassággal rohamosan csökken; a tropopauzájánál az átlagos hőmérséklet -58°C .

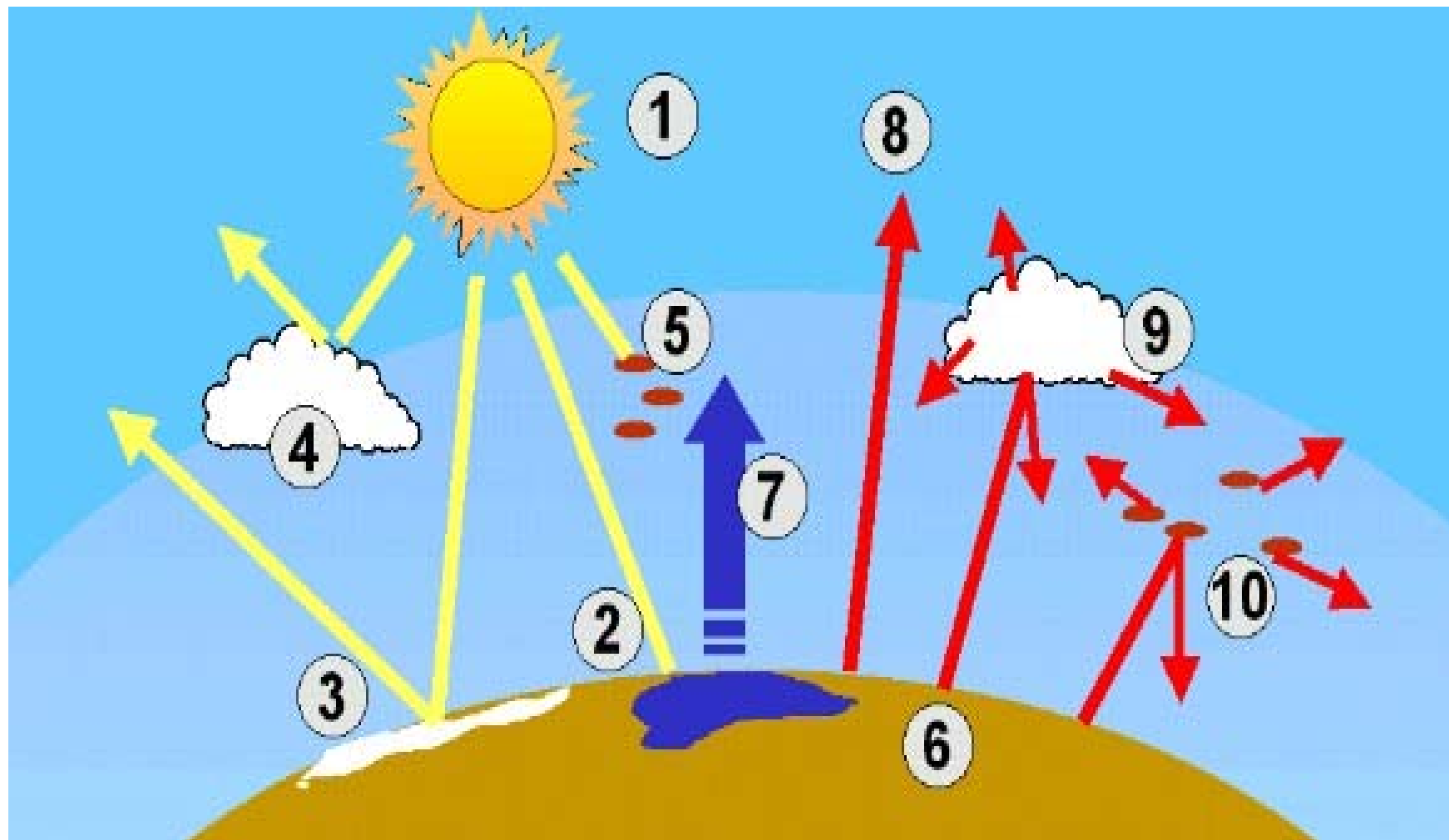
Az éghajlati rendszer globalis évi átlagos energiaegyensúlya



Egyensúlyi klímaállapot

- Stacionárius klímaállapot kialakulásához egyensúlynak kell beállnia az éghajlati rendszer által nyert napsugárzás és a rendszer által a világűrbe kibocsátott infravörös sugárzás között.
- Ehhez 235 Wm^{-2} energiát szükséges kisugároznia, ami -19°C értékű effektív emissziós hőmérsékletnek felel meg. A felszín magasabb hőmérsékletét azok a légköri gázok idézik elő, amelyek az infravörös kisugárzás jelentős részét elnyelik, majd minden irányban (így a felszín felé is) ismét kisugározzák. Ezt a mechanizmust természetes üvegházhatásnak nevezzük.

Energiaegyensúly – sematikus ábrája

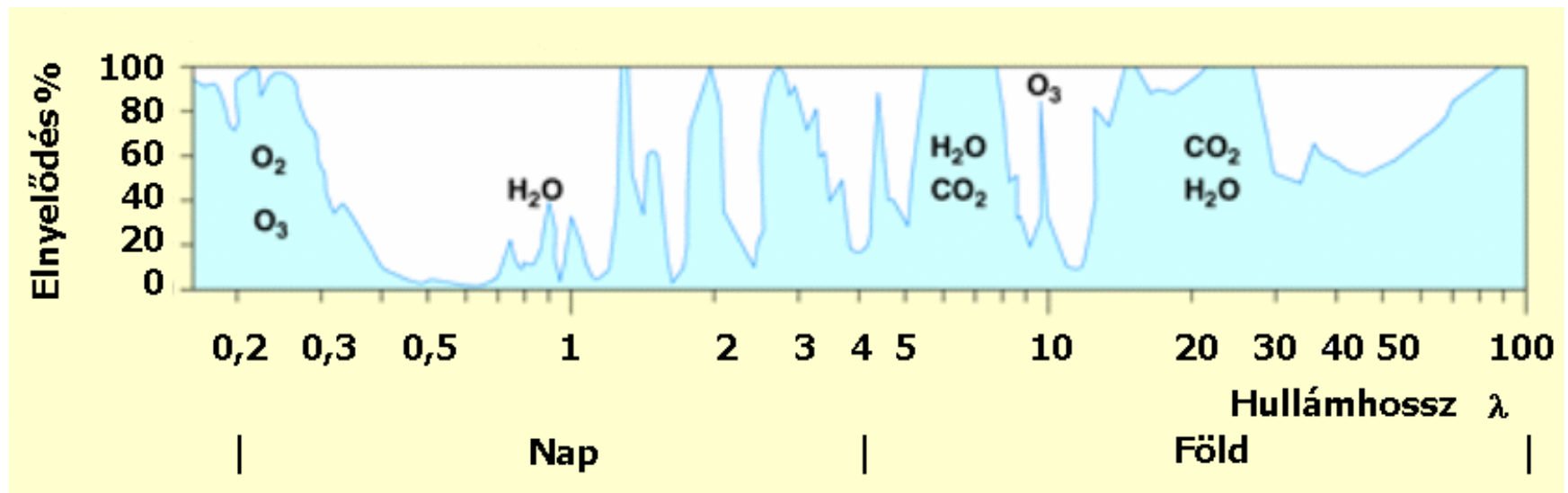


Bejövő sugárzás a Napból

Napfelszín hőmérséklete ~ 6000 K

A Föld hőmérsékleti kisugárzása

Földfelszín hőmérséklete ~ 288 K



Egyensúlyi klímaállapot

- Egyensúlyi klímaállapotban tehát a légkör felső határánál a beérkező és a világűr felé irányuló hőáramsűrűség átlagos különbsége nulla.
- Ha a napsugárzás vagy a földsugárzás intenzitásában változás következik be, akkor az egyensúly megbomlik, és a rendszer számára energiatöbbletet eredményező pozitív, vagy energiavesztést jelentő negatív nettó hőáram alakul ki.
- Ezt a kiegyensúlyozatlanságot a felszín–troposzféra rendszerre ható, Wm^{-2} egységben kifejezett **sugárzási kényszer**ként definiáljuk.
- A sugárzási egyensúlyt a klímaállapotnak az új feltételekhez történő igazodása állítja vissza.

Az éghajlat kényszerített változékonysága

- Hőegyenleg megváltozása → sugárzasi kényszer
 - Külső kényszerek: természetes (pl. a napsugárzás változása, vulkánkitörés) és antropogén
 - Belső éghajlatalakító mechanizmus – egyensúlyra való törekvés

Az éghajlat kényszerített változékonysága

- A természetes külső kényszerek:
 - extraterresztrikus:
a napsugárzás változékonysága és a Föld orbitális paramétereinek ingadozása, pl:
 - a napállandónak a 11 éves napfoltciklust kísérő változása $\pm 0,2 \text{ Wm}^{-2}$;
 - a Nap fejlődésével a teljes kisugárzás intenzitása lassan növekszik. Ennek hatását az 1645 és 1715 közötti (az ún. Maunder-minimum) időszakához viszonyítva, $+0,7 \text{ Wm}^{-2}$
 - a Föld a Nap körüli pályájának lapultsága, az excentricitás a földtörténet során mindig igen kicsiny ($< 0,07$) volt, $\pm 0,2\%$ -
 - terresztrikus:
 - vulkántevékenység

Az éghajlat kényszerített változékonysága

- A sugárzási kényszerhez vezető antropogén hatások: az ipari forradalomtól számottevő külső éghajlatalakító tényezők:
 - az emberi tevékenység a természetes üvegházhatást fokozó gázok kibocsátásával,
 - aeroszol részecskék levegőbe juttatásával,
 - a természetes felszín átalakításával képes „nem szándékos” módon módosítani a légkörön belüli sugárzásátvitelt.

Az éghajlat kényszerített változékonysága – antropogén hatások

- Az antropogén eredetű üvegházgázok 1750-es évektől az ezredfordulóra bekövetkezett növekedése együttesen $+2,43 \text{ Wm}^{-2}$ értékű globális átlagos sugárzási kényszert fejt ki.
- Ennek 60%-a ($+1,46 \text{ Wm}^{-2}$) a légkör szén-dioxid koncentrációjának mindenekelőtt a fosszilis tüzelőanyagok elégetése nyomán több mint egyharmaddal történt megnövekedéséből származik.
- Az üvegházhatású gázok között külön említést érdemelnek a légkörből korábban teljesen hiányzó halogénezett szénhidrogének (a freonok), amelyek amellett, hogy intenzíven abszorbeálják az infravörös sugárzást, előidézői a sztratoszferikus ózonritkulás veszélyes folyamatának.

Az éghajlat kényszerített változékonysága – antropogén hatások

- Direkt sugárzási kényszerként a légkörben lebegő kicsiny cseppfolyós és szilárd aeroszol részecskék bizonyos típusai a napsugárzás egy részét visszaverik a világűrbe, ami részben (sőt, helyileg és átmenetileg akár teljes mértékben) ellensúlyozhatja a fokozott üvegházhatást.
- Rövid légköri tartózkodási idejük révén azonban ez a sugárzási kényszer térben és időben igen változó.
- Léteznek aeroszokok (például a korom), amelyek elnyelik a napsugárzást, lokálisan melegítve a légkört, vagy elnyelnek és az infravörös tartományban kisugároznak, $+0,2 \text{ Wm}^{-2}$ -rel járulva hozzá az üvegházhatás fokozásához.

Az éghajlat kényszerített változékonysága – antropogén hatások

- Indirekt hatásként az aeroszol részecskék mint kondenzációs magvak a felhőcseppek számát, sűrűségét és méretét befolyásolják, megváltoztatva ezzel a felhőzet optikai tulajdonságait, ami mai ismereteink szerint összességében igen bizonytalan értékű, $-0,3$ és $-1,8 \text{ Wm}^{-2}$ közötti sugárzási kényszert eredményez.

Az éghajlat kényszerített változékonysága – antropogén hatások

- A földhasználat (például a trópusi esőerdők irtása, vagy az elsivatagosodással járó túllegeltetés) mint antropogén éghajlatalakító-tényező elsősorban a felszíni albedó növekedését okozva jelenik meg. Az ehhez kapcsolódó sugárzási kényszert $-0,2 \text{ Wm}^{-2}$ -re becsülik, és ennek az értéknek mintegy a fele az emberiség történetének utolsó, iparosodott korszakában alakult ki.

Az éghajlat szabad változékonysága

- A természetes és antropogén eredetű külső éghajlatalakító-tényezők által keltett **kényszerített klímamódosulás** mellett az éghajlati állapot viselkedésének meghatározó vonása **a természetes szabad változékonyság**.
- Ez a rendszer komponensei között kialakuló nemlineáris kölcsönhatásokkal (visszacsatolásokkal), illetve az aperiodikus (kaotikus) jellegű szabad változékonysággal függ össze.
- Mindaz a bizonytalanság, ami a múltbeli klímaváltozások és a napjainkban megfigyelt éghajlati tendenciák oksági magyarázatát, továbbá egy jövőbeli klímaállapot projektálását (feltételes előrejelzését) övezi, a természetes éghajlatalakító-tényezőknek legnagyobbbrészt erre a belső mechanizmusára vezethető vissza.

Az éghajlat szabad változékonysága

- A belső éghajlatalakító mechanizmus különböző tényezőit sorra véve, a klímadinamika egyik dilemmája, hogy az antropogén eredetű üvegházgázok által 1750 óta keltett sugárzási kényszer miként realizálódott: az energiabevétel többletének hányad része fordítódott a felszín hőmérsékletének emelésére, illetve mennyi az a hő, amely napjainkban az óceánban tárolódik, és amelyet „nem-realizálódott melegedés” néven szokás emlegetni.

Visszacsatolások

Visszacsatolások

- A klímaállapot természetes változékonyságát idézik elő
- *Hőmérséklet–jég–albedó* visszacsatolás:



*felszíni hőmérsékletcsökkenés → jégtakaró növekedése
→ visszaverődés növekedése*

- *Felhőzet–sugárzás* visszacsatolás:



negatív visszacsatolás: a felhők inkább hűtenek, mint fűtenek

Aperiodikus szabad változékonyság

- Az aperiodikus szabad változékonyság:

Földünk két hatalmas geofizikai folyadék entitásának, a légkörnek és a világóceánnak a modelljei a nemlineáris dinamikai rendszereknek ahhoz a népes családjához tartoznak, amelynek inherens belső tulajdonsága a kaotikus viselkedés.

A szabad változékonyság értéktartománya a fizikailag megengedett összes állapotra kiterjed, lehetővé téve azok eltérő gyakoriságú bekövetkezését.

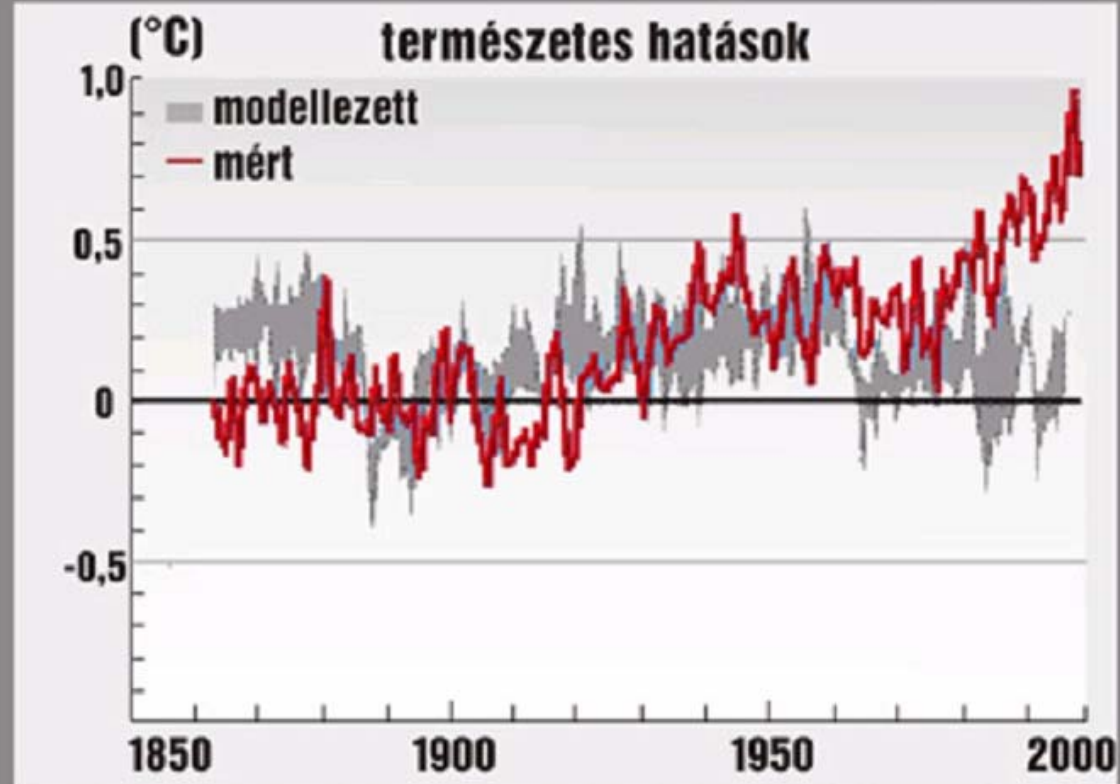
A modellszámítások eredményeit a valós légkörre értelmezve, ezért még az olykor szokatlanul halmozódó extrém időjárási események, vagy az éghajlati idősorokban jelentkező, tartósabban egyirányú trendek is lehetnek olyan folyamatok, amelyeket nem külső éghajlatalakító kényszerek váltanak ki.

A felszíni hőmérséklet emelkedése még a szabad belső változékonyságon belül van, vagy már az antropogen kényszer hatása?

- A mérések szerint a globális felszíni középhőmérséklet a 20. század során $+0,6 \pm 0,2$ fokkal változott, amit a tengerszint 0,1–0,2 m-es emelkedése kísért.
- A melegedés jelentős része két szakaszban, 1910 és 1945 között, valamint 1976 után következett be. 1861 óta az hét legmelegebb esztendő az utolsó tíz évben fordult elő.
- Joggal vetődik fel tehát a kérdés, hogy mindez még a szabad belső változékonyság keretén belül történt-e, vagy az antropogén külső kényszer által keltett „jel” esetleg már a természetes viselkedés kaotikus „zajszintje” fölé emelkedett?

A felszíni hőmérséklet emelkedése még a szabad belső változékonyságon belül van, vagy már az antropogen kényszer hatása?

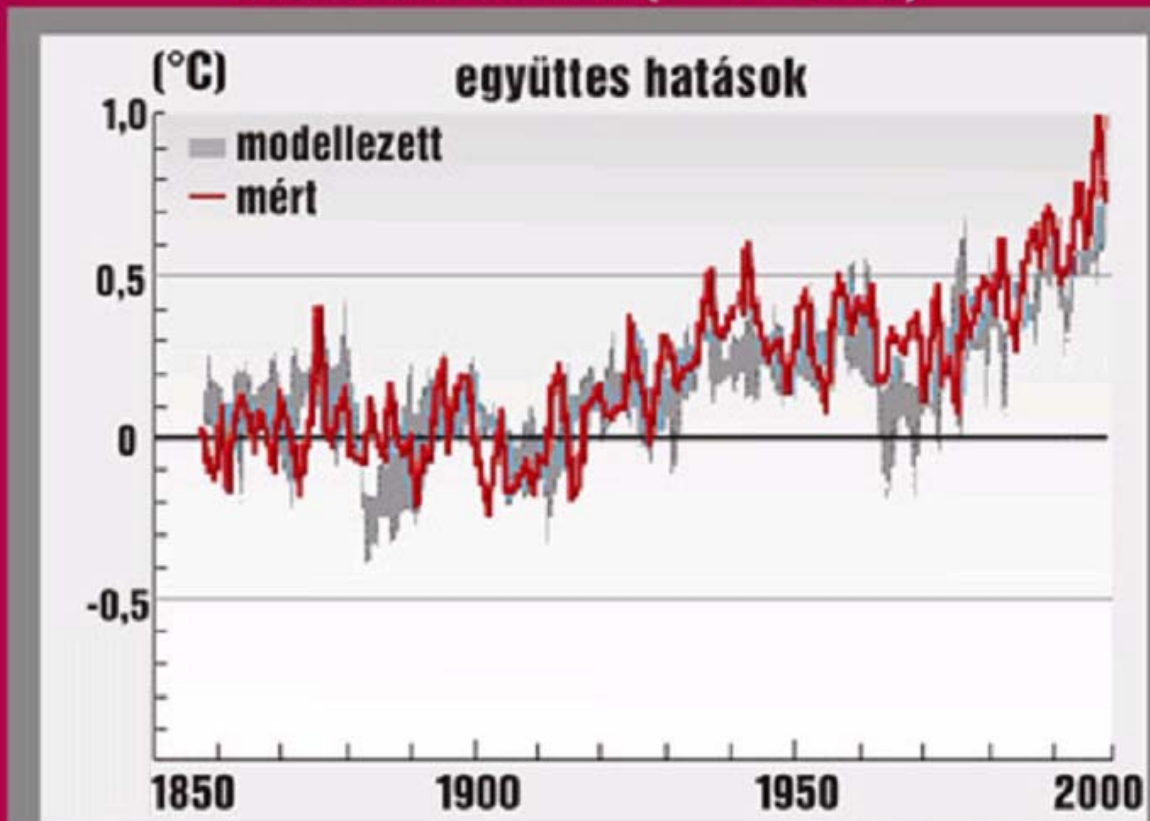
A modellezett és mért hőmérsékletváltozások összehasonlítása (1860–2000)



IPCC nyomán, 2001

A felszíni hőmérséklet emelkedése még a szabad belső változékonyságon belül van, vagy már az antropogen kényszer hatása?

**A modellezett és mért hőmérsékletváltozások
összehasonlítása (1860–2000)**



IPCC nyomán, 2001



KÖSZÖNÖM A FIGYELMET!