

Cordell, Oklahoma, 1981. máj.

NOAA PHOTO LIBRARY

KIS ATLASZ A NAPRENDSZERRŐL (4):

BOLYGÓLÉGKÖRÖK ATLASZA

Bérczi Szaniszló, Hargitai Henrik, Illés Erzsébet, Kereszturi Ákos, Opitz Andrea, Sik András, Weidinger Tamás

ELTE TTK Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoport, Uniconstant, Budapest–Püspökladány, 2002.



Balatonvilágos, 2002. aug.

Bérczi Szaniszló, Hargitai Henrik, Illés Erzsébet, Kereszturi Ákos, Opitz Andrea, Sik András, Weidinger Tamás (2002):
KIS ATLASZ A NAPRENDSZERRŐL (4):
BOLYGÓLÉGKÖRÖK ATLASZA.

Az ELTE TTK / MTA Geonómia Bizottság Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoportja 2002-ben a Bolygó-légkörök atlaszával folytatta azt a 2000-ben indított könyvsorozatot, amelyben a Naprendszerrel szerzett legújabb eredményeket kívánja elérhetővé tenni az érdeklődő tanár kollégák, egyetemi és főiskolai hallgatók körében. Az elmúlt évtizedekben megismert bolygók közül többnek a légköre is összehasonlítási lehetőséget nyújt a földi légkör tanulmányozásához. A Vénusz sűrűbb és a Mars ritkább légköre mellett a Jupiter és a Szaturnusz áramlási rendszere is tartalmaz olyan egyedi vonásokat, amelyek megismerésével a földi atmoszféra folyamatainak áttekintésére adódnak újabb szempontok. A bolygó-légkörökről kötetünkben hierarchikus képet vázolunk föl. Előbb a nagyléptékű folyamatokat tekintjük át, majd "leszállunk" a felszínre ott, ahol ezt megtehetjük, s a légkört "alulnézetben" tanulmányozzuk. Leginkább itt nyílik lehetőség a földi meteorológiából már megismert jelenségek (felhők, csapadékok, szélrendszerek, örvények) beépítésére. Már a földi légkörzés globális folyamatainak jobb megismerése is az űrkutatás eredménye. Kötetünk olvasása közben gondoljunk arra, hogy űrszondán tartózkodunk, mérünk, s így valós nézőpontot kapunk egy bolygó légkörének szemléléséhez. Nem csak a földfelszínen álló ember nézőpontja értékes ma már, hanem a folyamatokba "beprepülő" kutatók nézőpontja is és a Naprendszer vizsgálata megkívánja, hogy újabb és újabb nézőpontokba rendezve tekintsük át a gyarapodó ismereteket. A szerzők nagy lelkesedéssel fogtak hozzá ahhoz, hogy a kötet anyagát összegyűjtsék és nyomdakész oldalak előállításával a munka gyors megjelentetését előmozdítsák. Olvasva a bolygótestek légköréről talán a földi környezetvédelem fontos szempontjai is megjelennek Önök előtt, s érzékelik, milyen sok szálon kapcsolódnak egymáshoz a bolygók felszíne közelében megfigyelhető természeti folyamatok. A Bolygótestek légköréről szóló gyűjteményes áttekintésünk láttatja majd, hogy munkánkkal nemcsak a planetológia kedvelőinek, hanem a környezetvédők, a geológusok és a természettudományok különféle ágait tanító kollégák számára is hasznos olvasmány született. Értékes órákat, sok fölfedezést és élményt kívánnak az olvasóknak a

Szerzők

TARTALOMJEGYZÉK:

1. A LÉGKÖRÖK FÖLFEDEZÉSE (Hargitai H.)
2. A LÉGKÖRÖK EREDETE (Illés E., Kereszturi Á., Hargitai H., Bérczi Sz.)
 - 2.1 A légkörök kialakulása
 - 2.2 A légkörök megmaradása
 - 2.3 A légkörök felszínbe épülése
3. A FÖLDI LÉGKÖR RÉTEGZŐDÉSEI (Illés E., Kereszturi Á., Hargitai H.)
 - 3.1 Semleges és ionizált összetevők
 - 3.2 A légkör rétegei fűtések szerint
 - 3.3 A légkör változásai
 - 3.4 Légkör-fűtés és üvegházhatás
4. AZ ÓRIÁSBOLYGÓK LÉGKÖRÉNEK SZERKEZETE (Opitz A., Bérczi Sz.)
 - 4.1 Övezetesség az óriásbolygókon
5. A FÖLDI LÉGKÖR HIERARCHIKUS DINAMIKÁJA (Weidinger T., Bérczi Sz.)
 - 5.1 A Föld nagyméretű áramlási rendszere
 - 5.1.1 Az általános cirkulációs cellák
 - 5.1.2 A rossby hullámok fejlődése
 - 5.2 A földi ciklonok és anticiklonok keletkezése
 - 5.2.1 A polárfiórt elmélet
 - 5.3 A felszínről megfigyelhető légköri jelenségek
 - 5.3.1 Felhők
 - 5.3.2 A légkör energiaháztartása
 - 5.3.3 A légkör energiamérlege
 - 5.4 A planetáris határreteg
 - 5.5 A konvektív skála
 - 5.6 A fényforrások fényének szóródása és törése a légkörben lebegő részecskéken
 - 5.6.1 A szivárvány
 - 5.6.2 A Hold körüli halo: szembeszórás jégkristályokon
 - 5.6.3 Debye-Scherer szórás röntgenfényel, ásványokon
 - 5.6.4 A jégkristályok alakja a hőmérséklettel változik
6. A FÖLDINÉL SŰRŰBB LÉGKÖRÖK SZILÁRD FELSZÍNŰ BOLYGÓTESTEKEN (Hargitai H.)
 - 6.1 Titán
 - 6.1.1 A Titán légkörének összetétele
 - 6.2 Vénusz

7. A MARS LÉGKÖRI JELENSÉGEI (Sik A.)

- 7.1 Kihűlt, száraz üvegház
- 7.2 Furesa felhőformák
- 7.3 Por: tölcserék és viharok
- 7.4 Nyugodt időjárás, változó éghajlat

8. RITKA LÉGKÖRŰ ÉGITESTEK (Hargitai H., Kereszturi Á.)

- 8.1 Merkúr-légkör napszélből és a kőzetek anyagából
- 8.2 A Hold "Légköre" Na-csóvával

8.3 A Galilei holdak légkörei

- 8.3.1 Io: pamacslégkör a vulkánkitörésekből
- 8.3.2 Ganymédész
- 8.3.3 Európa

8.4 Jeges kis égitestek légköre

- 8.4.1 Triton: globális fölmelegedés
- 8.4.2 Plútó: jég-főnix légkör
- 8.4.3 A Charon

8.5 Az üstökösök átmeneti légköre: kóma és csóva

- 8.6 A légkör, a hőmérséklet és a gázok jellemzőinek összefüggései
 - 8.6.1 Jeges, kőzetek, légkörök

9. A LÉGKÖRÖK FEJLŐDÉSE (Hargitai H.)

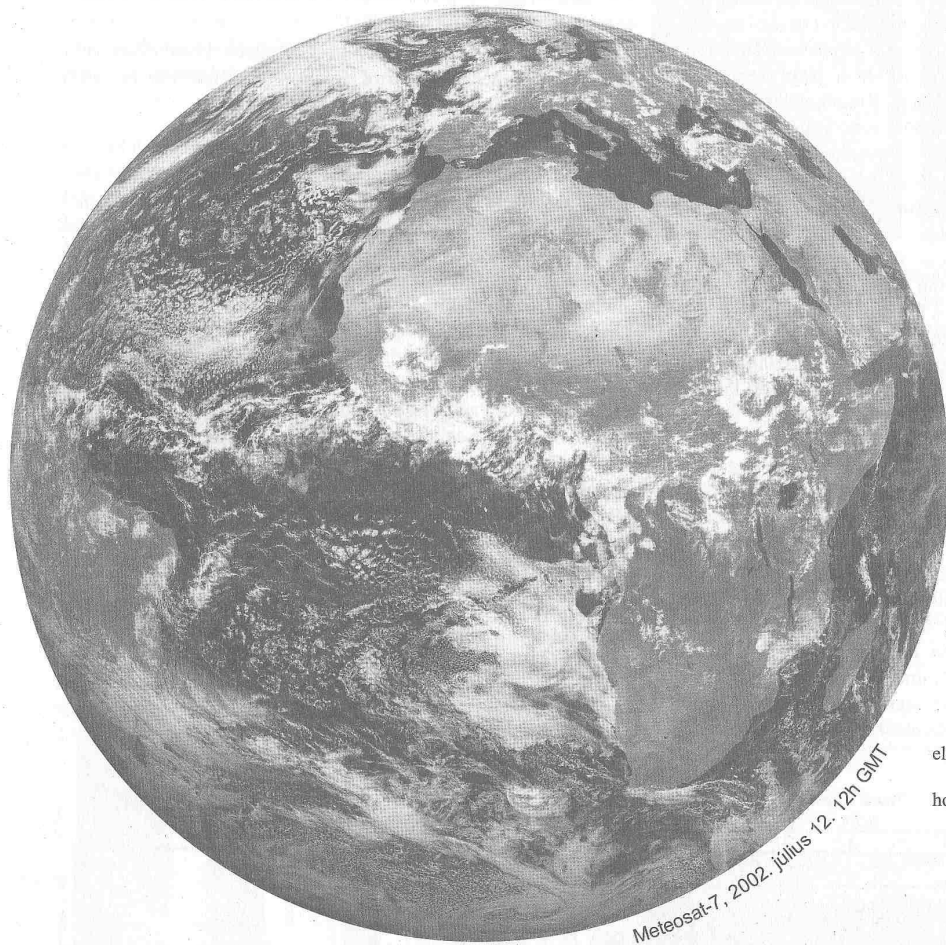
Irodalom

ÖSSZEFOGLALÓ TÁBLÁZATOK (Hargitai H., Illés E.)

E munka megjelentetését
a Magyar Űrkutatói Iroda az
ELTE TTK / MTA Geonómia Bizottság
Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoport
TP-154/2002 számú témapályázata keretében támogatta.

E támogatásért a szerzők a MŰI-nek köszönetet mondanak.
Kiadja az UNICONSTANT, Püspökladány, Honvéd u. 3.
Érdeklődés az atlasz iránt: bercziszani@ludens.elte.hu

Bérczi Szaniszló, Hargitai Henrik, Illés Erzsébet, Kereszturi Ákos,
Opitz Andrea, Sik András, Weidinger Tamás (2002):
KIS ATLASZ A NAPRENDSZERRŐL (4):
BOLYGÓLÉGKÖRÖK ATLASZA.
ISBN 963 00 6314 XÖ
963 204 061 9



A globális felhőzeti kép

A bal oldalon látható, látható tartományban készített műholdképen jól látható a globális felhőzeti és áramlási mező szerkezete. (Hasonlítsuk össze a vízgőz elnyelési sávjában Európáról ugyanekkor készült képpel, mely a légtömegek víztartalmát mutatja - 5.1.2. fejezet).

A termikus egyenlítő (a passzátszelek összeáramlási zónáját) a hatalmas felhő-clusterekből, zivatarfelhőkből álló öv jelöli ki (Nyugat-Afrika partvonala, illetve az Atlanti-óceán felett). Az egyenlítői cirkulációs zóna leszálló ágában (szubtrópusi magassnyomás) alakulnak ki a nagy sivatagok (kis mennyiségű, túlnyomórészt gomolyos felhőzet).

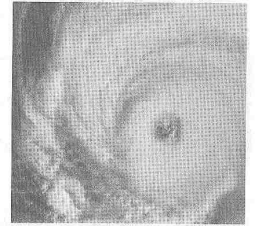
A több tíz kilométeres zivatarfelhők kis kör alakú fehér foltokként jelentkeznek. Óceáni területek felett jól kivehetők az 50 km-es karakterisztikus méretű méhsejtszerűen elrendezett felhőcellák.

A 6-8 ezer km-es karakterisztikus méretű ún. Rossby-hullámok uralják a mérsékelt és a magas szélességek

áramlási rendszerét mindkét féltekén. A több ezer km-es felhősávok a polárfront elhelyezkedését mutatják. E szakadozott frontálzóna körbefutja a Földet. Tekintsünk csak Európa és az észak-atlanti térség felhőzetére, vagy a déli félgömb Afrika és Antarktisz közötti területeire.

Nyugat-Európa időjárását egy ciklonális rendszer határozta meg 2002. július 12-én, a kép készültkor. Jól látszik ennek az öregedő ciklonnak a zárt felhőzete. Hazánk meleg, nyáris időjárás volt. Nem látunk frontálzónát (összefüggő felhőzeti mezőt).

A kis képen egy trópusi ciklon felhőrendszerét mutatjuk be. Jól látható a konvektív felhőzeti mező és a 20-40 km-es karakterisztikus méretű középső felhőmentes terület. Ez a trópusi ciklon szeme.



A légköri mozgásrendszerek jellemző mérete és élettartama

A különböző skálájú légköri mozgásrendszerek jól elkülönülnek egymástól. Kialakulásukban a horizontális (nagy- vagy makroskála) és a függőleges instabilitások (kisebb skálák) játszanak szerepet.

légtartam	1 millió mp.				1 hét			1 nap			10 óra			10 ezer mp.		
	Tornádó, víztőlcsér			Front, viharvonal, hegy-völgyi szél			Trópusi ciklon			Ciklon Anticikl.			Rossby-hullámok			
Turbulencia	1m	100 m	1000 m	1000 m	10000 m	100000 m	1000000 m	10000000 m	100000000 m	1000000000 m	10000000000 m	100000000000 m	1000000000000 m	10000000000000 m	100000000000000 m	1000000000000000 m
Szállókések	100 m	1000 m	10000 m	10000 m	100000 m	1000000 m	10000000 m	100000000 m	1000000000 m	10000000000 m	100000000000 m	1000000000000 m	10000000000000 m	100000000000000 m	1000000000000000 m	10000000000000000 m
Porviharok	100 m	1000 m	10000 m	10000 m	100000 m	1000000 m	10000000 m	100000000 m	1000000000 m	10000000000 m	100000000000 m	1000000000000 m	10000000000000 m	100000000000000 m	1000000000000000 m	10000000000000000 m
Örvények	100 m	1000 m	10000 m	10000 m	100000 m	1000000 m	10000000 m	100000000 m	1000000000 m	10000000000 m	100000000000 m	1000000000000 m	10000000000000 m	100000000000000 m	1000000000000000 m	10000000000000000 m

Bérczi Szaniszló, Hargitai Henrik, Illés Erzsébet, Kereszturi Ákos, Opitz Andrea, Sik András, Weidinger Tamás

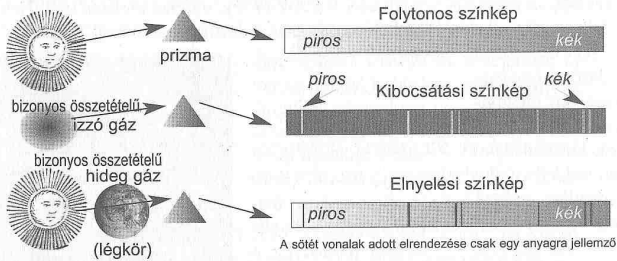
KIS ATLASZ A NAPRENDSZERRŐL (4): BOLYGÓLÉGKÖRÖK ATLASZA

ELTE TTK Koszmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoport, Uniconstant, Budapest–Püspökladány, 2002.

I. A LÉGKÖRÖK FÖLFEDEZÉSE

Mi árulja el egy távoli égitestről, hogy van légköre?

Színképelemzés. Ha egy távoli égitest akár egyetlen fénypontnak is látszik, színképe ez alapján már meghatározható. Kétféle spektrumot lehet vizsgálni: az emissziós (kibocsátási) és abszorpciós (elnyelési) színképet. Ezek a különböző kémiai elemek „ujjlenyomatait” mutatják.



A sötét vonalak adott elrendezése csak egy anyagra jellemző

Folytonos emissziós spektrum például a szivárvány, ami a Nap által kibocsátott fény, egyes összetevőire bontva (e jelenséget Newton ismerte fel). Izzó testek mindig ilyen folyamatos spektrumot adnak, azaz minden frekvencián sugároznak. Atomos vagy egyszerű molekulájú ritkább, hűvösebb gázok viszont **vonalas spektrumot** adnak, azaz csak néhány frekvencián sugároznak. Ezeket a frekvenciákat az egyes atomok energiaszintjei határozzák meg.

Az **elnyelési színképet** akkor kapjuk, ha egy folytonos színképű (izzó anyag által kibocsátott) fény olyan anyagon hatol keresztül,

melynek vonalas a színképe. Így a légkörön áthatoló napfényben sötét – elnyelési – vonalak lesznek, méghozzá épp ott, ahol azonos anyagú (izzó) gáz esetén kibocsátási vonalak lennének (Kirchhoff törvénye). A Nap emissziós vonalait (mely a Nap és a Föld légkörének anyagait mutatja meg) Joseph Fraunhofer rajzolta le először 1814-ben, de még nem tudta mire vélni a vonalak természetét. Talált olyan elnyelési vonalcsoportot is, mely semmilyen földi fényforrás esetén nem jelentkezett. Az ezt okozó gázt később héliumnak nevezték el (a Napról).

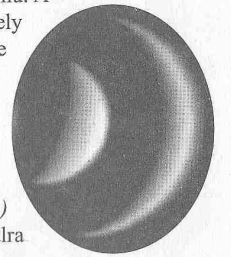
A légkörök elemzéséhez elnyelési (abszorpciós) színképet használnak: a folyamatos spektrumú napsugárzás áthatol egy gázon, az ott levő anyagok bizonyos hullámhosszakon elnyelik a sugarakat, másokon nem. Ahol a Föld légkörében nincs elnyelés és a fény szabadon juthat le a felszínig, azt a hullámhossztartományt légköri ablaknak nevezik. Az emberi szem számára látható tartományban (kb. 0,4-0,7 μm) található az egyik ilyen légköri ablak, ahol csaknem teljes az átérésztés. A másik a rádiótartományba esik. Az elnyelési tartományokban a világútból érkező sugarak nem jutnak le a felszínre, illetve a felszínről kifelé igyekvők sem jutnak ki a légkör fölé (ezen alapszik az üvegházhatás).

A spektrumok elemzése a múlt században sokszor tévútra vitte a kutatókat: a Marsról bizonyosan állították, hogy rengeteg vízgőz van légkörében. Bizonytalan volt a vízgőztartalom a Vénusz színképében is. Csökkentette a mérési bizonytalanságot, a légkör zavaró hatását, ha a távcsövet minél magasabbra helyezik (hegycsúcsra, ballonra), hogy a földi légkör zavaró hatását minél kisebbre csökkentsék. Az 1930-as évektől mértek a hegycsúcs-

kon, és a vízgőz vonalai el is tűntek a Mars és a Vénusz esetében, és megjelent a CO_2 -é.

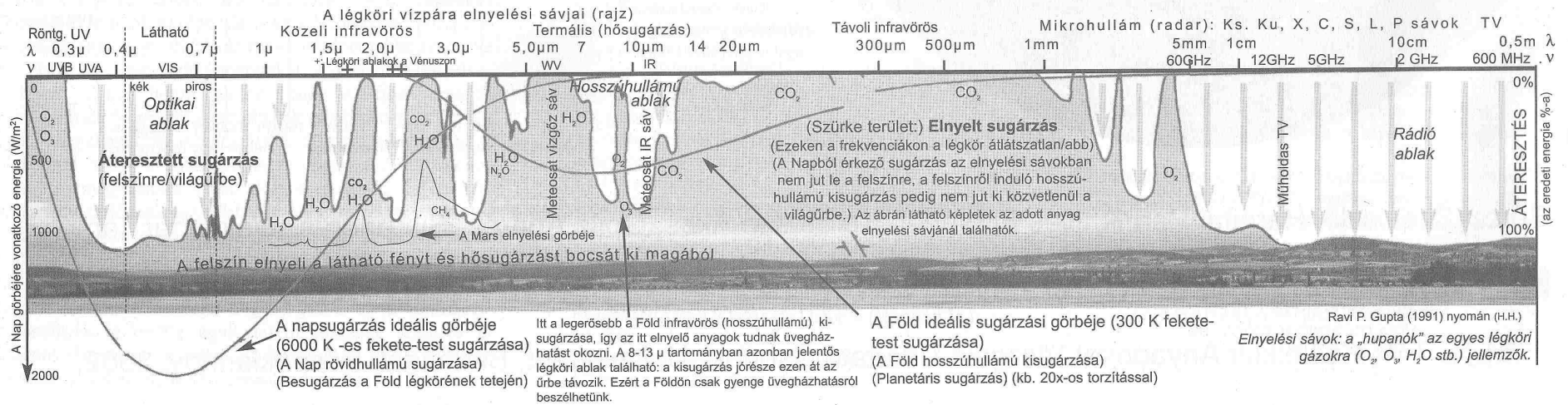
A Jupiterről szóló, 1960-as években született könyvekben még ammónia és metán légkörről írnak – ma már tudjuk, hogy légkörének fő alkotórésze a hidrogén és a hélium.

Foltok. Amíg egy bolygó felszínén csak különböző alakú foltokat tudunk megfigyelni, színképelemzés nélkül is következtethetünk a légkör meglétére: ha a foltok alakja megváltozik, eltűnnek, újak jelennek meg, akkor ezek a foltok valószínűleg felhők. Ha a foltok alakja változatlan, és szabályos időközönként ugyanott jelennek meg, akkor valószínűbb, hogy a felszín látjuk, amint elfordul előttünk. De ez nem mindig ilyen egyértelmű. A Jupiter esetében a Nagy Vörös Foltot, amely viszonylag stabil képződmény, eleinte forró felszíni lávának hitték, a Titán narancs légkörében viszont nincsenek foltok, az egységesen narancs színű.



Szarvak. A légköri fénytörés miatt a sarló alakúnak mutakozó Vénusz (kép) szarvának csúcsai túlnyúlnak a sötét oldalra is. Ez is légkör jelenlétét mutatja.

Csillagfedés. Ritkán, de előfordul, hogy egy bolygó égi útja során a Földről nézve eltakar egy csillagot. Az ilyen csillagfedésekkor a csillag fényének változásából következtetni lehet a bolygó légkörének sűrűségére és szerkezetére: amint a csillag egyre közelebb kerül a bolygó felszínéhez: a légkör a csillag fényét egyre jobban elnyeli, az tehát fokozatosan halványul el, ill.



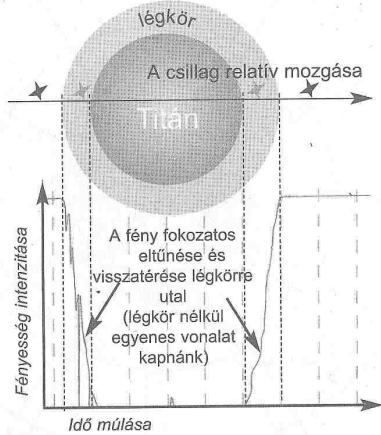
A Nap gőrbéjére vonatkozó energia (W/m^2)
 A felszín elnyeli a látható fényt és hőszugárzást bocsát ki magából
 A napsugárzás ideális gőrbéje (6000 K-es fekete-test sugárzása) (A Nap rövidhullámú sugárzása) (Besugárzás a Föld légkörének tetején)

Itt a legerősebb a Föld infravörös (hosszúhullámú) kisugárzása, így az itt elnyelő anyagok tudnak üvegházhatást okozni. A 8-13 μm tartományban azonban jelentős légköri ablak található: a kisugárzás jórésze ezen át az űrbe távozik. Ezért a Földön csak gyenge üvegházhatásról beszélhetünk.

A Föld ideális sugárzása (300 K fekete-test sugárzása) (A Föld hosszúhullámú kisugárzása) (Planetáris sugárzás) (kb. 20x-os torzítással)

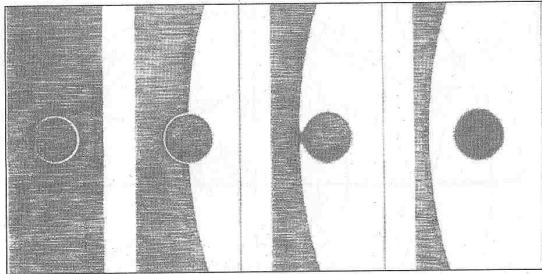
Ravi P. Gupta (1991) nyomán (H.H.)
 Elnyelési sávok: a „hupanók” az egyes légköri gázokra (O_2 , O_3 , H_2O stb.) jellemzők.

erősödik fel a fedés után a másik oldalon. (A bolygókörüli gyűrűk létét hasonlóan lehet kimutatni.) Ha egy égitestnek nincs légköre, csillagfedéskor egyik pillanatról a másikra hűny ki a csillag fénye.

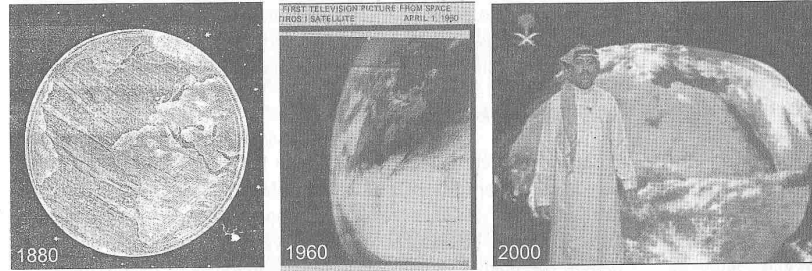


A Titán elfedi a 28Sgr csillagot (1989, mérés alapján)

Átvonulás. 1761-ben az orosz Lomonoszov jött rá elsőként, hogy a Vénusznak van légköre. Pétervárot a Vénusz Napkorong előtti átvonulását (tranzit) figyelte meg, hogy



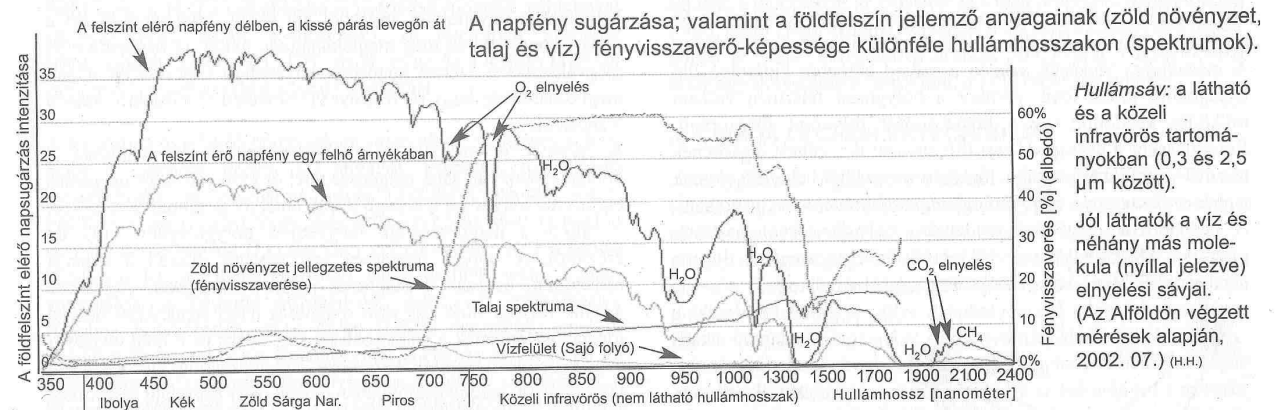
megállapíthassa a bolygó átmérőjét. Pontosán azonban nem tudta megfigyelni, mert egy zavaró hatás elmosta a bolygó peremét. A Napkorong elől kikerülő Vénuszon pedig még egy különös jelenséget figyelte meg: egy világos udvar vette körbe a bolygót (lásd a *korabeli rajzot*). Hasonló udvart látott a Voyager űrszonda is a Titán körül, mikor visszazétt a Titán sötét oldalára: hátulról a Nap világította meg légkörét.



Idegen Naprendszer bolygójának légköre. Egy, a Naprendszeren kívüli bolygó légköreinek összetételét először egy 2001-es átvonuláskor, színképelemzés segítségével állapították meg. A 150 fényévre levő HD209458 nevű csillag színe kicsit megváltozott, amint a bolygója elhaladt előtte (hogy épp e csillag és a Föld között legyen a bolygó a megfigyeléskor, ahhoz nagy szerencse kell). A csillag színképének megváltozása arra utalt, hogy a 0,7 Jupiter-

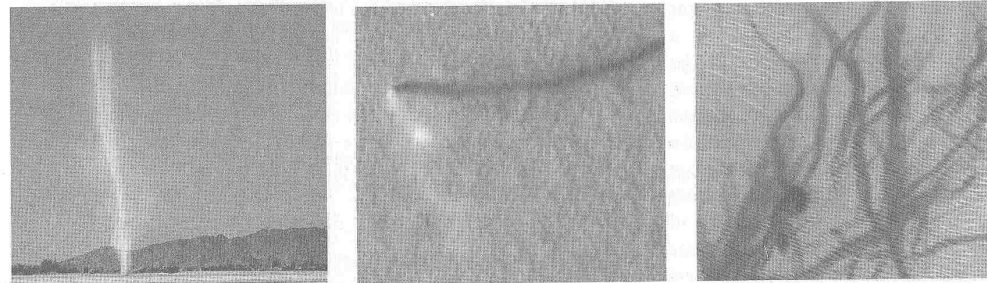
tömegű és 3,5 napos keringési idejű bolygó légköre elnyelte a csillag fényét bizonyos tartományban. Ebből a légkörében nátrium jelenlétére lehetett következtetni.

A Titán a Nap irányában fényképezve (Voyager felvétel). Jól látszik a gyűrű, mely a Nap által megvilágított, a bolygót körbefogó légkör fénye.



Hullámsáv: a látható és a közeli infravörös tartományokban (0,3 és 2,5 μm között).

Jól láthatók a víz és néhány más molekula (nyílal jelezve) elnyelési sávjai. (Az Alföldön végzett mérések alapján, 2002. 07.) (H.H.)



Analogia és eltérő nézőpont alkalmazása egy légköri jelenség felderítésében. Portölcseér (*dust devil*) a Földön (*balra*), a Marson (felülről, az árnyékával együtt fényképezve) (*középen*) és a Mars egy másik területén portölcseérek felszínén húzott nyoma (*jobbra*).

2. A LÉGKÖRÖK EREDETE

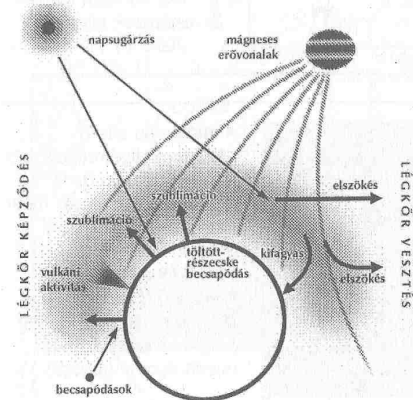
2.1. A légkörök kialakulása

A bolygótestek illóanyaga a szoláris kőd porával került a bolygókba a szilárd szemcsékre adszorbeálódva. Az óriás-bolygók, a környezetükben lévő gázt, később, amikor már tömegük elég nagy volt, gravitációsán is magukhoz tudták kötni. A bolygórendszer belső részén, ahol a Nap erős sugárzása miatt a hőmérséklet olyan magas volt, hogy a porszemcsékkel együtt nem épülhetett be illó anyag, számítógépi szimulációk alapján úgy gondolják, hogy az üstökösanyagok és a 20-30%-nyi vizet tartalmazó kisbolygók szállították a vizet a Naprendszer külső részéről, és becsapódásukkal juttatták el azt a kifejezett bolygókra, pl. a Földre is.

A szilárd kérgű bolygótestek első, eredeti (primordiális) légkört az ütközésektől felmelegedett testek kigázosodása hozta létre, a bolygók kialakulása után. Az ősi légkörökben lévő gázokat a viszonylag kis szökési sebesség miatt a nagy becsapódások mind el is fűjták. Az óriásbolygók légköre azonban, a légkörükben uralkodó nagy szökési sebesség miatt, a Naprendszer egész élete folyamán megmarad, ezért azok légköre ma is az eredeti légkör.

A másodlagos légkörök szintén a szilárd kéregből kipárolgó illó anyagokból jöttek létre. Amikor a bolygótest felszínén vulkáni működés kezdődött, ez a kigázosodási folyamat fölgyorsult. Becsapódáskor a becsapódó test illó anyagai is a céltest légkörének részévé vált. Gazdagították a légkört a napszélből bekerülő atomok is, bár ezek szerepe a nagy tömegű légkörök esetén elhanyagolható. A nagyon ritka légkörrel rendelkező bolygótesteknél azonban, például a Merkúrnál, ez az összetevő lényeges, mert az ilyenek légkörének 98%-a a napszélből származó hélium alkotja.

Az Ióval és a Merkúrral kapcsolatban megemlítjük az ún. pamacs légkör fogalmát. Akkor használjuk ezt a kifejezést, ha nem az egész bolygót beburkoló légkör jön létre, hanem egy lokális hely felett keletkezik rövid időre illóanyag-burok. A Merkúron a forró, Nap alatti



Légkörgyapadás és -vesztés egy óriásbolygó holdjának példáján. (K.A.)

pólusok kigözölgése hoz létre légkör-pamacsokat. Az Ion a vulkánok környezetében egy rövid időre jön csak létre légkör, amely kb. 20 óra alatt, a nagy tömegű Jupiter miatt, elszökik.

2.2 A légkörök megmaradása

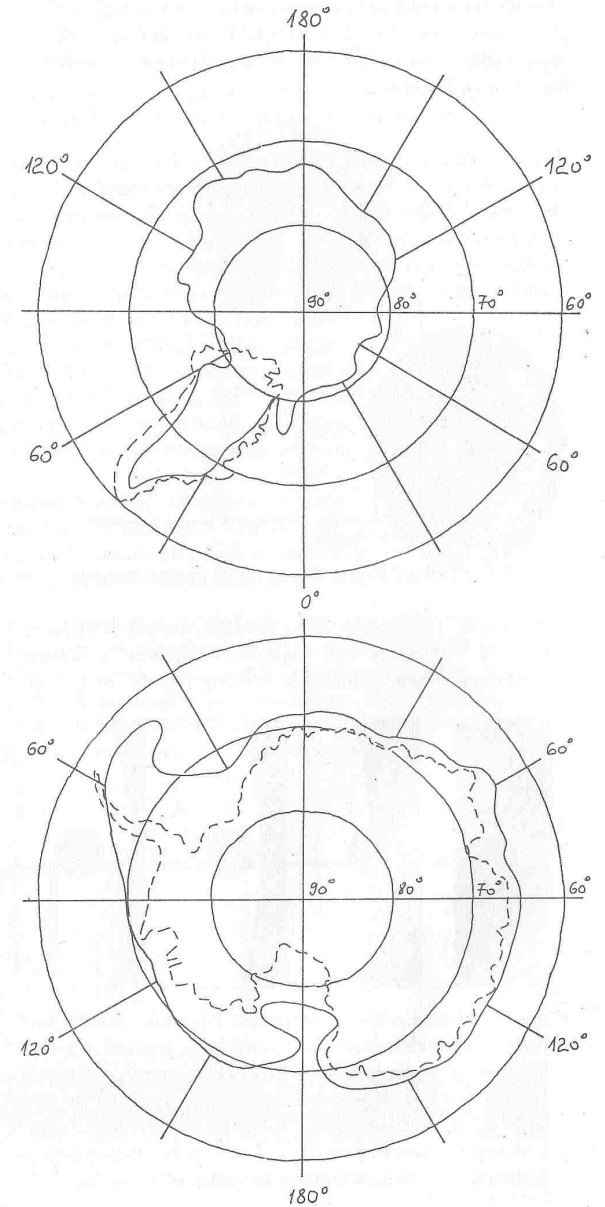
A légkört többféle módon tünhet el egy bolygótest környezetéből. Egy nagy becsapódás akár az egész légkört elfújhatja egy pillanat alatt. A Mars esetében feltételezzük, hogy az Argyre Medencét létrehozó nagy becsapódás fýmódón vetett véget az ősi, meleg, nedves éghajlatnak. Korábban, a nagy légnyomás és üvegághatás okozta melegebb klíma miatt, folyók és állóvizek lehettek jelen a Mars felszínén.

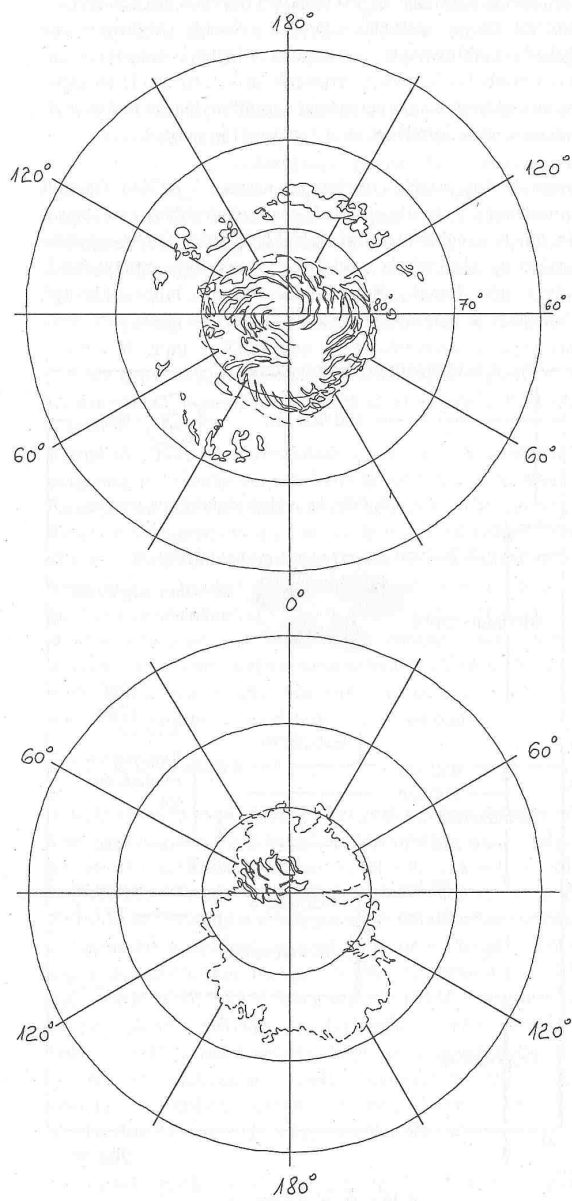
A légkört alkotó gázokban zajló hőmozgás lehetővé teszi a légkör lassú megszökését. Az így bekövetkező szökési folyamat a erősebb (növekszik) a hőmérséklet növekedésével és a bolygótömeg csökkenésével is. Ez a lassú folyamat különbséget tesz az izotópok között is és ennek következtében a nagyobb atomsúlyúak besűrűsödnek. Ha feltételezzük, hogy a Naprendszer összes bolygótéste ugyanolyan anyagból állt össze, mint amelyet ma a szenes kondritokban még megtalálhatunk, akkor az izotóparányok megváltozása a szenes kondritok anyagához képest segít annak megbecslésében, hogy pl. mennyi víz tünhetett el a Marsról vagy a Vénuszról.

A napszél is erodálja a bolygólégköröket. Ha azonban a bolygótestnek van saját mágneses tere, és ez olyan nagy mágneses burkot tud létrehozni a bolygó körül, amelyik tartalmazza a légkört is, akkor a magnetosféra megvédi a bolygólégkört ettől az erőtől. A bolygó mágneses tere ugyanis eltereli a napszél részecskéit, és csak a mágneses pólusok környékén engedi be azokat. Ha egy hold egy erős mágneses térrel rendelkező bolygó magnetoszférájának a belsejében mozog, akkor ez a hold élvezheti ezt a védelmet a napszéllel szemben. Ugyanez a hold viszont ki van téve a bolygó magnetoszférájában mozgó nagy energiájú részecskék bombázásának. Ha nincsen légkört tartalmazó (és így megóvó) magnetosféra, amely eltereli a napszél részecskéit, akkor a légkör üstökösveszélyes elnyúlik a Nappal ellentétes oldal felé. Ilyen például a Hold ritka légköre is, amely kétszer olyan távolsáig terjed ki a Nappal ellentétes oldalon, mint a Nap irányába.

A bolygótest saját mágneses tere esetén a magnetosféra elektromos terei felgyorsíthatnak ionokat a szökési sebesség fölé, és az így létrejövő „poláris szél” révén pl. a Föld is veszít légköréből. A magnetosféra gyors ionjai is, semlegesítődés után, mint nagy sebességű semleges atomok (*Energetic Neutral Atoms; ENA*)

A Föld két poláris sarkja is különböző méretű. Ennek fő oka az, hogy a déli pólus környezetében kontinens található: az Antarktisz. Ahol nagy szigeteket találunk az északi pólusnál (Grönland), ott az állandó jégtakaró szintén távolra nyúlik el a pólustól.





szökhetnek meg a légkörből akkor, ha a sebességvektoruk éppen kifelé mutat. (A semlegesítődés a hidrogénkoronák semleges hidrogénatomjaival való töltéscsere folyamatokban történhet meg.) Ha a sebességvektor a légkör felé mutat, akkor ugyanezek a részecskék a légkörre csapódva fűtik a légkört.

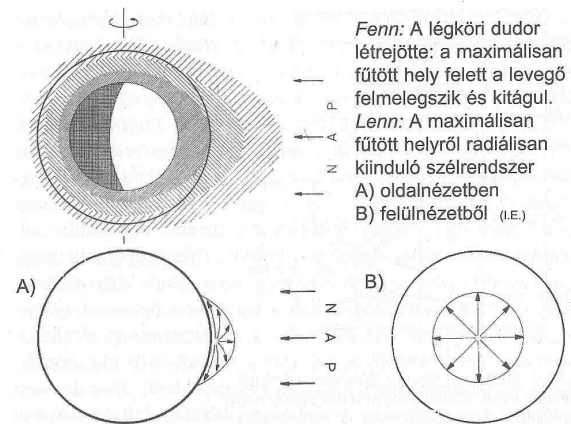
2.3 A légkörök felszínre épülése

A felszínre fagyhat a légkörnek az a része, amely a bolygótést felszínközeli hőmérsékletén le tud csapódni. A légköri kristályszemcsék poláris sapkákba (Föld, Mars, Triton, Plútó, Merkúr, Hold) gleccserekbe (eddig csak a Földről ismerjük), vagy a porviharok porával a felszínen lévő finom közetlisztszbe, a regolitba (Mars) kerülhetnek. Talajba is kötődhetnek a légkör bizonyos összetevői. Így a szabaddá vált oxigén rozsdát képezhet, a széndioxid karbonátokba kötődhet víz jelenléte esetén. A Földön nagy mennyiségű CO₂ tűnt el így a levegőből, főleg az élőlények építették azt magukba, de a Marson is talált karbonátot a Mars Pathfinder. A H₂O a szilikátokba is beépülhet hidratált szilikátokat alkotva (Föld, Mars, kisbolygók). A jéghegyek alacsony hőmérsékletén a CO₂, NH₃, CH₄, az N₂ és az Ar a légköri H₂O-val zárvány-vegyületeket (klatrátokat) is alkothat.

A légkörben megfelelő hőmérsékleti intervallum szükséges ahhoz, hogy a légkörbe került illó anyagok csapadék formájában lecsapódjanak, pl. eső/harmat révén (Vénuszon kénsav, sósav, Földön víz, savas esők), vagy hóesés/dér lerakódás révén (a Földön hó vagy dér, a Marson H₂O-dér vagy széndioxid-dér, az Ion kén és kéndioxid-dér, a Titánon nagyobb molekulásúlyú szénhidrogén-aeroszolok, a Tritonon nitrogén-dér, metán-dér formájában). Amelyik bolygótesten nincs olyan légköri összetevő, amelyik elnyeli a Nap ultraibolya sugarait, mint a Földön az ozon, ott az ultraibolya (UV) sugárzás lejut a felszínig. Ez az UV sugárzás, pl. a Marson, a légkörbe került H₂O-t azonnal elbontja, belőle a hidrogén feldiffundál a hidrogén-koronába és megszökik, az oxigén pedig oxidál, vagy szabad oxigénként felszaporodik a légkörben. A Földet az a vízbontási folyamat nem fenyegeti. Az UV sugárzás nem tud lejutni a felszínig az ózonréteg miatt a vizet elbontani. A vízpára pedig nem jut fel a sztratoszféráig, mert még előtte, a hidegcsapda miatt kicsapódik és visszahullik.

Ha a hőmérsékletváltozások ezt lehetővé teszik, akkor a két felszínközeli illóanyag-tartály, a légkör és a felszíni rétegek között körfor-

A Mars nagyobb északi és kisebb déli állandó poláris sapkája. A szaggatott vonal a jéggel kevert üledékréteg kiterjedését mutatja a pólusok körül. Megfigyelhetjük, hogy míg a déli jégsapka kicsi, ez a jéggel kevert üledékréteg messzire elnyúlik a pólusvidéktől a Mars déli pólusánál.



Fenn: A légköri dudor létrejötte: a maximálisan fűtött hely felett a levegő felmelegszik és kitágul.
 Lenn: A maximálisan fűtött helyről radiálisan kiinduló szélrendszer
 A) oldalnézetben
 B) felülnézetből (i.e.)

gás is lehetséges. Felszíni illóanyag-tartályok (rezervoárok) a poláris sapkák, a gleccserek, az óceánok és a talaj üregeiben megkötött jég (Föld, Mars Titán, Triton). Körforgás lehet még a kőpeny és a légkör között is, (lásd. *Bolygótetek atlasza, 2001*) ha a lemeztectonika aktív egy bolygótesten (erről csak a Föld esetében tudunk).

3. A FÖLDI LÉGKÖR RÉTEGZÖDÉSEI

A bolygótetek légköre vertikálisan egyensúlyban van. Ez azt jelenti, hogy a kis skálájú konvektív folyamatoktól eltekintve, (pl. kisebb marsi porviharok, a földi zivatarok vagy a tornádók) – nincsenek függőleges gyorsulások. Egy-egy légoszlopban vertikális egyensúly van. A nehézségi erő és a nyírési erő (vagy nyírési gradiens erő) tart egyensúlyt. A nehézségi erő a légköri elemeket a felszín irányába mozdítaná el, míg a nyomáskülönbségből származó erő ahogyan egy összenyomott rugónál a rugóerő felfelé (a világűr irányába) mozdítaná el a részecskéket. Ez az erő arányos a nyomás változásával. Szaknyelven e két erő egyensúlyát légköri sztatikának nevezzük. A sztatikus légkör alapegyenlete:

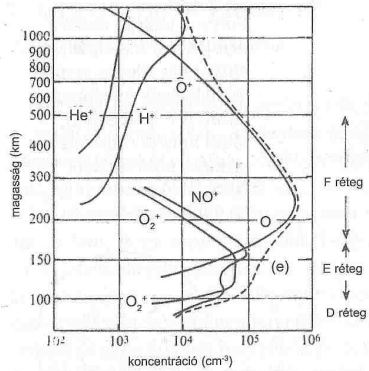
$$\Delta p = -\rho g \Delta z,$$

ahol Δp a Δz magasságváltozásra jutó nyomásváltozás, ρ a légréteg sűrűsége, g az adott bolygóra jellemző nehézségi gyorsulás. A negatív előjel arra utal, hogy a magasság változásával csökken a nyomás.

A légkörök sűrűsége a barometrikus magasságformulával leírható módon változik a magassággal

$$\rho = \rho_0 e^{-(r_0 - r) / H}$$

ahol ρ_0 a sűrűség a bolygó centrumától r_0 távolságban, ρ pedig r távolságban. H a skálamagasság, és azt jelenti, hogy mekkora távolságon belül csökken az illető összetevő sűrűsége az eed részére. H fordítva arányos a molekulatömeggel, vagyis nagyobb



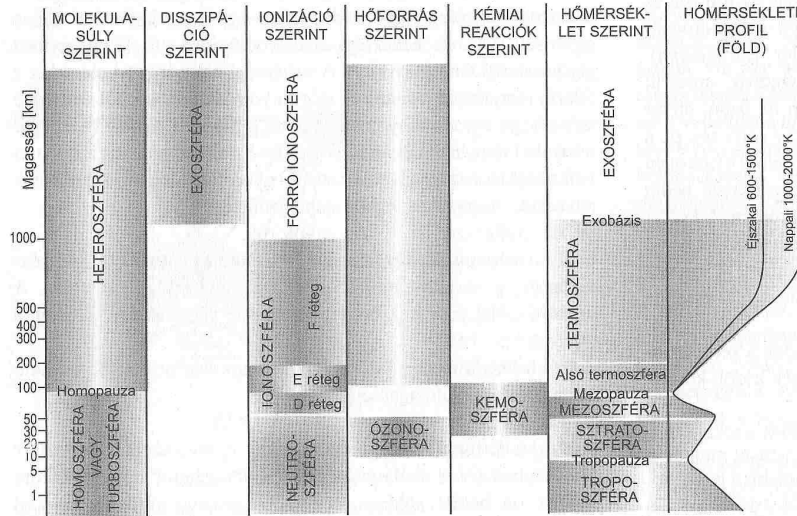
A Föld, Mars és a Vénusz légkörében a lényegesebb ionok koncentrációja a magasság függvényében. A szaggatott vonal az elektronsűrűség, amely azonos az össz-ionsűrűséggel. (I.E.)

3.1. Légkörök: semleges és ionizált összetevők

A légkörök különböző tartományait – a földi légkör esetében használtuk alapján különböző szempontok szerint nevezhetjük el.

A molekulásúly szerinti elnevezés: A sűrű légkörök alsó részén a molekulák szabad úthossza kicsi, ezért gyakran ütköznek. Itt jól kevert a légkör, összetétele állandó, a magasságtól független lesz

A földi légkör rétegei (I.E.)



molekulásúlyú összetevő előbb fogy ki a magassággal. Ennek az lesz a következménye, hogy összetevők szerint rétegzett lesz a légkör azon magasság felett, ahol már nem keveredik jól. (Megjegyezzük, hogy a fenti egyenletben, amit a planetológiában általánosan alkalmaznak, állandó hőmérsékletű, azaz izoterm réteg feltételezésével számolunk.)

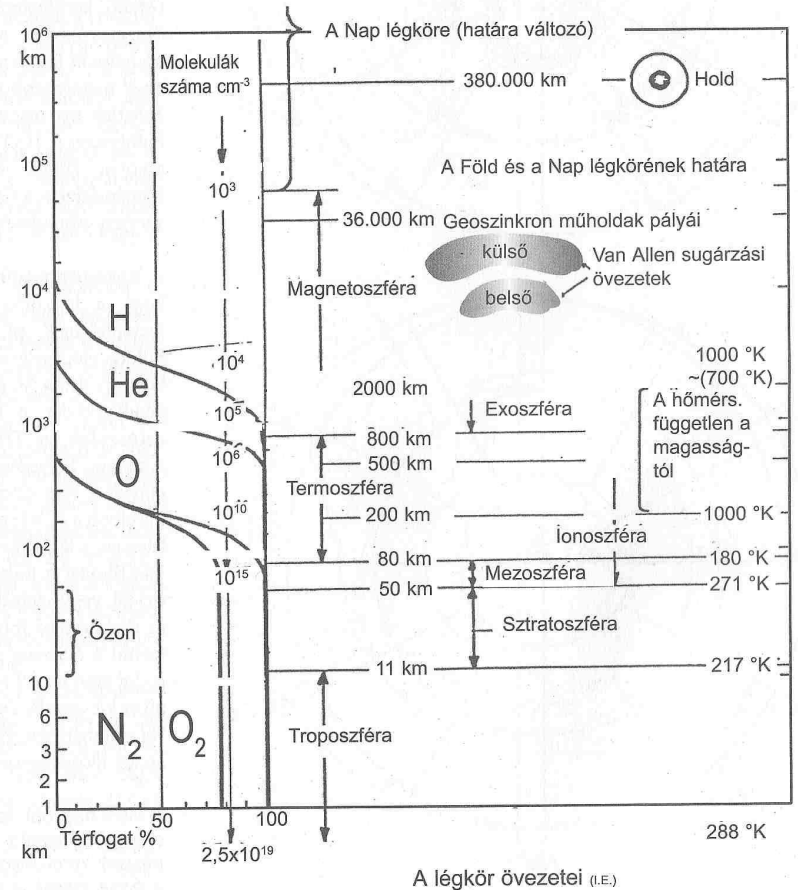
(homoszféra vagy turboszféra). Ahogy a sűrűség csökkenésével növekszik a szabad úthossz, a keveredés nem tökéletes, a légkör összetevők szerint rétegződni tud (heteroszféra). A kettőt elválasztó tartomány neve: homopauza. Efelett minden rétegben más lesz a domináns összetevő, az egymás feletti rétegekben a molekula vagy atomsúly a magassággal csökken. Minden légkörben legkivül a legkönnyebb elem, a hidrogén található. Ezt nevezzük hidrogénkoronának.

Disszipáció szerinti elnevezés: Exobázisnak azt a magasságot nevezzük, amely felett a légköri összetevők szabad úthossza olyan nagy, hogy kellő sebesség esetén el tudnak szökni a bolygóról (exoszféra). Igen kis sűrűségű légköröknél az exoszféra felszínig ér (Europa, Ganymedes, Io, Merkúr, Hold)

Ionizáció szerinti elnevezés: A Nap ultraibolya sugárzása minden gázt ionizál, így a bolygó légkörök legkülső rétegét is, amely még a sugárzás számára átjárható. Ezt a részt nevezik ionoszférának, az ez alatti rész a neutroszféra. Attól függően, hogy az ionoszférán belül egyegy rétegben melyik összetevő ionjai dominálnak, több ionoszféra réteg is keletkezhet (Földnél D, E, F1, F2 réteg). A sűrűbb légrétegekben még gyakran ütközve az ionok rekombinálódnak, de ahol nagyobb a szabad úthossz, a mágneses tér jelenléte esetén az ionizált összetevők mozgása töltésüktől függően szétválhat, sebességük az elektromos tereken felgyorsul. Mozgásuk a mágneses erővonal körül spirálozó (giromozgás), így nagyobb magasságba feljuthatnak, és egy övszerű tartományt töltöttek fel a bolygótest körül, a plazmaszférát, amelyet már a magnetoszféra részének tekintenek. Itt bizonyos karakterisztikus energiájú töltött részecskék bizonyos erővonalak mentén környezetét népe-

sítik be, ezeket sugárzási vagy Van Allen övezeteknek nevezzük. A töltéstől függő szétválás után az erősebb mágneses térű bolygóknál a felgyorsult elektronok a légköri összetevőknek ütközve ultraibolya fénylésre gerjesztik azokat. Ez az electrolow, vagyis az elektronok által gerjesztett égboltfénylés, az Uránusznál nagyon erős, itt fedezték fel, de a Jupiternél is észrevehető.

Hőforrás és hőmérséklet szerinti elnevezés: A szilárd felszíni bolygótesteknél a légköröket fűtő közeg elsősorban általában a felszín, amely a légkör alját fűti. A légkörön áthaloló fény ugyanis a felszínen nyelődik el, és a felszín a szomszédos légrétegeknek adja át a hőt. Ennek az a következménye, hogy a levegő hőmérséklete a magassággal csökken. Ezt a részt nevezzük



A légkör övezetei (I.E.)

troposzférának, és ez a meteorológiai események színtere, pl. felhőképződés ebben a rétegben történik, itt formálódnak a ciklonok és anticiklonok, és itt működik a földi három cirkulációs cella is.

A másik fűtőközeg a légkör tetején a termoszféra, amely minden bolygótestnél megtalálható. Az ultraibolya és extrém ultraibolya sugárzás bontja a molekulákat, és ez fűtést eredményez. A hőmérséklet egy határértékig nő a magassággal (exoszferikus hőmérséklet: T8), de innen már a szökési sebességet elérő atomok elszöknek (exoszféra), ezért nem nő tovább a molekulák átlagos sebessége, vagyis a hőmérséklet. A Földnél az oxigént, a Vénusznál és a Marsnál a szén-dioxidot bontja az extrém ultraibolya sugárzás. Miután a CO₂ kisebb hatáskeresztmetszettel disszociál, mint az O₂, ezért a CO₂-dominált légkörű Mars és Vénusz exoszferikus hőmérséklete sokkal alacsonyabb (~300 K), mint a Föld O₂-dominált légkörének az exoszferikus hőmérséklete (~1000 K).

Közbülső fűtőréteg előfordulása esetén a felszíntől kezdve a magasság növekedésével csökkenő hőmérséklet újra emelkedővé válik (sztratoszféra; Földnél pl. az ózonréteg miatt: ozonoszféra). Amelyik bolygónál nincs közbülső fűtőréteg, ott sztratoszféra sem található. E definíció szerint a Földön létezik sztratoszféra, és lehet, hogy a Titánon is van. A közbülső fűtőréteg feletti részt, ahol újra csökkenővé válik a hőmérséklet, mezoszférának nevezik. A troposzféra–sztratoszféra közötti átmeneti tartomány neve: tropopauza, a sztratoszféra–mezoszféra közötti sztratopauza, a mezoszféra–termoszféra közötti mezopauza, a termoszféra–exoszféra közötti az exobázis.

3.2 Uralkodó szelek

A légkörök nem merev testként forognak együtt a bolygótestekkel. Ha a légkör gyorsabban vagy lassabban forog, mint a bolygótest, azt zonális szélként érzékeljük a felszínhez kötött koordináta-rendszerben. Szuperrotációról beszélünk akkor, ha a légkör gyorsabban forog, mint a bolygótest. A szuperrotáció a Vénuszon a legerősebb: a légkör 4 nap alatt futja körbe a tengelye körül 243 nap alatt körbeforduló bolygót. A földi felsőlégkör csak 1,3-szor gyorsabban rotál, mint a bolygótest. A Titánon várnak még erős szuperrotációt. Miután a légkörök együtt forognak a bolygótestekkel, ezért érthető, hogy az Uránusz bolygón is az egyenlítővel párhuzamos zonális áramlást találtak a Voyager szonda otjáratkor, annak ellenére, hogy a pályasíkban elhelyezkedő forgástengely éppen a Nap felé nézett.

Az óriásbolygók és a Nap légköre a növekvő szélességgel

csökkenő sebességgel rotál, ezt differenciális rotációnak nevezzük. Ez az oka annak, hogy az egyenlítői légköri alakzatok segítségével meghatározott forgási periódus a legrövidebb.

3.3 A bolygólégkörök fűtése

A légkörök hőt a bolygótest belsejéből és a Naptól kapnak. A bolygótestből kiszivárgó hő szimmetrikusan, míg a Naptól érkező sugárzás aszimmetrikusan fűti a bolygótestet. A Naptól érkező elektromágneses sugárzás legjobban a szubszoláris pontban fűt, vagyis azon pontban, ahol a Nap éppen a zenitben tartózkodik. A korpuszkuláris sugárzás által okozott fűtés mágneses tér esetén a mágneses pólusok környékén a legnagyobb, de mágneses tér hiánya esetén bárhol fűthet.

Üvegházhatás: Ha a légköri összetevők valamelyike infravörösben elnyel, akkor a felmelegedett bolygófelszín által kibocsátott hőmérsékleti sugárzás infravörös része fogva marad a légkörben mindaddig, amíg a felszín annyival melegebb nem lesz, hogy az általa így már rövidebb hullámhosszon kibocsátott sugárzás át tud hatolni a légkörön. A Vénuszon nagyon erős az üvegházhatás a nagynyomású CO₂ légkör miatt. A CO₂-n kívül üvegházhatást okoz a vízgőz, a metán és az ammónia is.

Napszakos hőmérsékletváltozás: A Nap elektromágneses sugárzásával maximálisan fűtött helyen a hőmérséklet megnő, a levegő kitágul. Ez más szavakkal azt jelenti, hogy az azonos hőmérsékletű helyeket összekötő felület nagyobb magasságra emelkedik: légköri dudor (bulge) jön létre. Ez a légköri dudor a Napról nézve mindig ugyanott van, csak a bolygótest forog el alatta. Azonos magasságban szemlélve a jelenséget ez úgy látszik, hogy a szubszoláris pont felé közeledve a hőmérséklet nő. A Földön kívül csak a Marson mérték ki a napi görbét a Viking leszálló egységek, de a nappali és az éjszakai hőmérsékletéről más bolygótestek felszínéről is rendelkezünk mérési adatokkal, így a Holdról, az Európáról, a Ganymedesről, a Callistoról, a Rheáról, a Merkúrról, a Vénuszról és a Plútóról.

A felszíni anyag hőkapacitásától függően a maximális hőmérséklet elérésének időpontja különböző mértékben késik a helyi délhez képest. A Földön a kimért késési adat a felsőlégkörben pl. 2-5 óra. A maximálisan fűtött helyen létrejövő nyomásnövekedés hatására minden irányba radiálisan szelek indulnak. Ezt az áramlást téríti el a forgásból származó Coriolis erő.

Szezonális (évszakos) változás: Ha egy bolygó forgástengelye

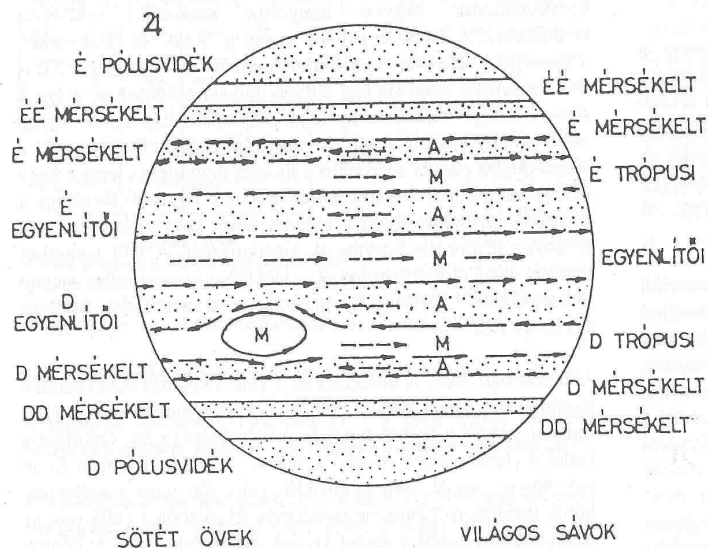
nem merőleges a pályasíkra, akkor a maximálisan fűtött hely szélessége változik a keringés folyamán. Egy ilyen bolygó kötött keringő holdján is ugyanilyen értelmű változás zajlik. Egy ilyen bolygó hajló pályán keringő holdján a két hajlás kombinálódása nagyon bonyolult szezonális változást eredményez. A Tritonon például emiatt a "Rák-" és "Bak-térítő" szélessége is változik, és előfordul, hogy 56°-os szélesség felett is zenitbe kerül a Nap. Ha egy bolygó pályája excentrikus, akkor a fűtés erőssége változik a keringés folyamán. Egy ilyen bolygó holdján ugyanilyen értelmű változás zajlik. A Marsnál a tengelyhajlás okozta szezonális változást bonyolulttá teszi a nagy pályaeccentricitás, valamint a déli félgömb nagyobb távolsága a tömegközépponttól, aminek következtében nagyon kedvezőek a feltételek a globális porviharok kialakulására. A déli tavaszkor ugyanis sok CO₂ dér párolog el, a légkörben ugrásszerűen megnő a szén-dioxid parciális nyomása, s ez erős szeleket indít az egyenlítő felé.

Hőmérsékleti övek: A hőmérséklet, s vele a nyomás növekedése a maximálisan fűtött helyről minden irányba globális cirkulációt indít el, amely a légkör forgásával kölesönhatva ún. cirkulációs cellákat (*hőmérsékleti öveket*) alakít ki. Minél gyorsabban forog egy bolygó, annál több cirkulációs cella jön létre a szélességi körök mentén. A Vénuszon mindegyik félgömbön 1 cella van, az egyenlítőnél felszáll a meleg levegő, a pólusoknál le. A Földön mindegyik félgömbön 3 (trópusi, mérsékeltövi és sarkvidéki), a Jupiteren 6-8, a Szaturnuszon 20 cirkulációs cella is azonosítható. Ezekben a bolygókon a cellák a hőt az egész bolygó felszínére osztják tovább. A Vénuszon az egyetlen cella azonnal a pólusokra szállítja az egyenlítőn elnyelt hőt, s emiatt gyakorlatilag nincs is különbség az egyenlítői és poláris vidékek felszíni hőmérséklete között. A Marson viszont a modellszámítások szerint egyetlen cella van csak, amely átnyúlik az egyenlítőn annak következtében, hogy a Mars alakjának középpontja és a Mars tömegközéppontja 3 km-rel eltér egymástól. Így a Mars déli pólusa 6 km-rel magasabban fekszik, mint az északi pólus. Az egyetlen cirkulációs cella ahelyett, hogy elosztaná az egyenlítőn kapott hőt, inkább a különbségeket növeli, és a déli félgömből közvetlenül az északra juttatja a vízgőzt. Ez is lehet az egyik oka annak, hogy a Mars két állandó poláris sapkája annyira különböző méretű, és különböző összetételű (a déli főleg CO₂, az északi főleg H₂O).

Belső mágneses térrel rendelkező bolygóknál a nagyon szabályos zonális áramlást a korpuszkuláris sugárzásból energiát merítő, és a magnetoszféra viharok idején a mágneses sarkok környékén betáplált fűtés megzavarja, torzítja.

4. AZ ÓRIÁSBOLYGÓK LÉGKÖRÉNEK SZERKEZETE

4.1 Övezetesség az óriásbolygókon

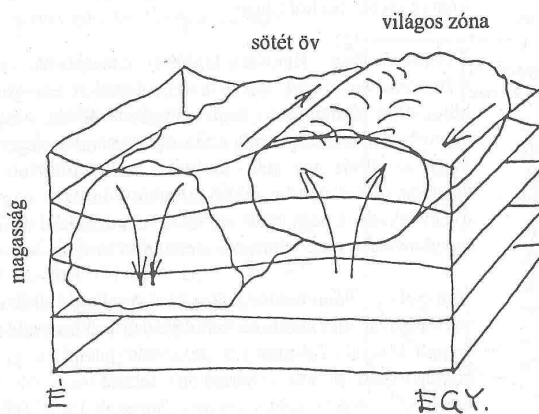


Az óriásbolygók egy 10-15 földtömegű jéges mag kezdeti összeállításából (akréciójából) és az azt körülvevő köd gravitációs összehúzásából alakultak ki. A jelenleg elfogadott modell szerint az Uránusz és a Neptunusz összehúzásakor jelenlevő protoszoláris gáz sokkal hígabb volt, mint a Jupiter és a Szaturnusz esetében. Ez alacsonyabb tömegüket is magyarázza. Ezért az óriásbolygók két alcsoportra oszlanak, a gázóriásokra (Jupiter, Szaturnusz) és a jégóriásokra (Uránusz és Neptunusz). Ilyen megvilágításban a Jupiter tűnik a legegyszerűbb bolygónak, hiszen tömegének csupán jelentéktelen részét teszi ki a kezdeti mag, szinte teljes egészében az ősi gázfelhő maradványa.

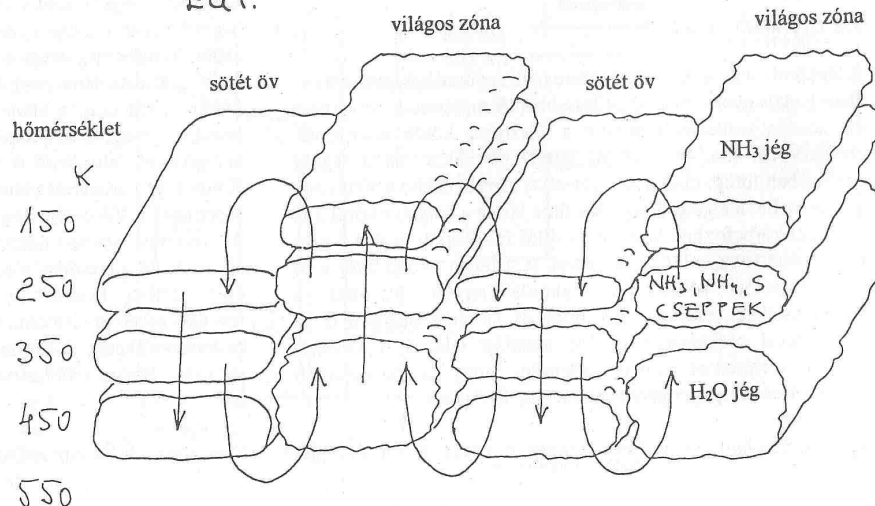
A főként hidrogénből és héliumból álló négy óriásbolygó őrizte meg leginkább a bolygóképződéskor a Napot körülvevő ősködben uralkodó viszonyok emlékeit. Sokáig úgy hitték, hogy az óriások kémiai összetétele nagyjából megegyezik, s így jól visszaadja az ősködbeli viszonyokat. Ahogy a négy óriásbolygóról szerzett

ismereteink bővültek, főként a Voyager misszió eredményeként, kiderült, hogy a valóság sokkal bonyolultabb, sokkal összetettebb, mint ahogy hittük.

A Jupiter tengely körüli forgása gyors: 9 óra 55 perc. Ez okozza a bolygó jellegzetes, az egyenlítőjével párhuzamos övekre és zónákra osztott szerkezetét. A gyors forgás erős Coriolis-erőt kelt, azaz oldalra irányuló erőt, mely a fűtött helyről, azaz a bolygó termális egyenlítőjéről szétáramló légtömegeket az északi félgömbön jobbra, míg a délin balra téríti el.



A Jupiter légkörében három-féle anyag alkot csapadékot. Felülről lefelé haladva ezek a következők: ammónia-jég, ammónia és benne oldott anyagok cseppjei, aeroszolként, s legmélyebben a vízjég kristályai. A fölfelé áramló világos zónákban ezek a csapadékrétegek kissé magasabban találhatóak, mint a lefelé áramló sötét övekben, mert a hőmérséklet is más lefutású a kétféle övezetben.



A feláramlások világos sávjait nevezzük zónáknak, míg a sötétebb leáramlásokat öveknek. A vertikális hőmérséklet rétegződés - a földihez hasonlóan - a magassággal csökkenő hőmérsékleteket jelent. A zónák a hűvösebb magaslégkörben fekszenek, míg az övek alacsonyabban vannak, így melegebbek, hiszen mélyebbre látunk a bolygó légkörében. Az övek és zónák intenzitása évről-évre változik, időnként elhalványodnak, máskor pedig kivilágosodnak.

A felhőzet tetején az övekben összeáramlás, azaz konvergencia, míg a zónákban szétáramlás, azaz divergencia történik. Alul pont ellentétes az áramlási kép. Így alakulnak ki a Hadley-típusú áramlási cellák. Ezekből a Jupiteren 6-8 található.

A Coriolis-féle eltérítő erő következtében a zónák és övek határain keleti és nyugati szelek fújnak váltakozva. Ezen jetek közel állandó sebességük több mint száz éve. Sebességük körülbelül 100 m/s. A nagy sebességű és ellentétes irányba fújó szelek erős szélnyírást okoznak a bolygó légkörében.



A felhőzet gyors változása konvekcióra utal. Jelenlegi kutatások szerint nedves konvekció történik, mely a Jupiter belső hőjéből táplálkozik. Ez olyan, mint a földi viharok kialakulásakor szerepet játszó feláramlás. A Földön a napsugárzás hatására a felmelegedett talajról megindul a nedvesség tartalmú légtömeg feláramlása, majd egy adott magasságban, ahol a hőmérséklet alacsonyabb, megtörténik a kondenzáció, vízcseppek keletkeznek, melyek felhőket alkotnak. A Jupiteren a bolygó belső hője melegíti fel az alsóbb rétegeket, s indítja meg a konvektív felhőképződést. Gyakran fordulnak elő heves viharok a Jupiter légkörében, sőt villámlással járnak.

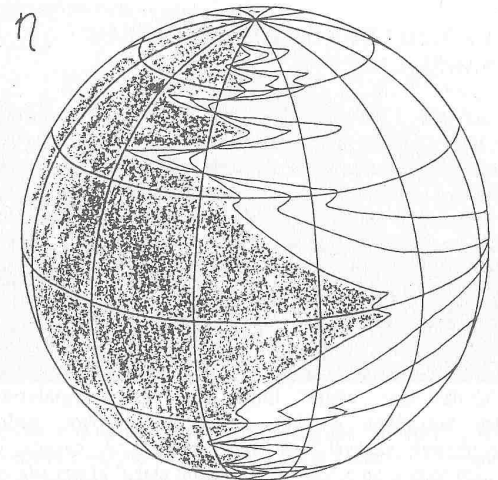
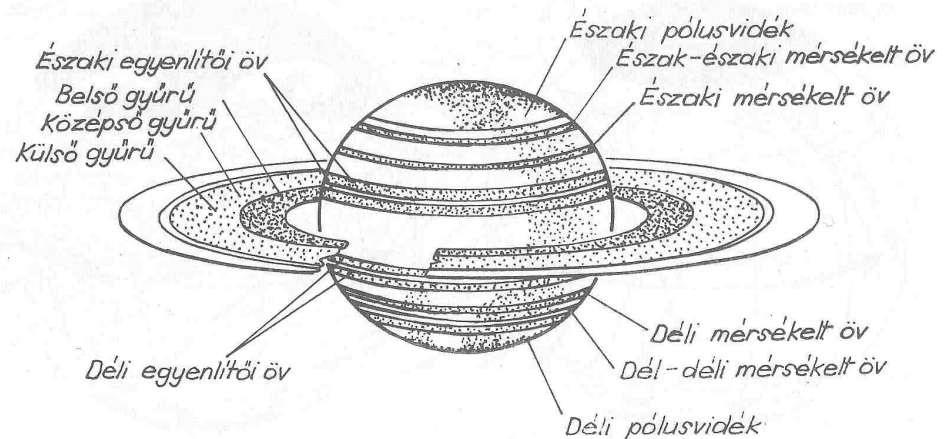
A Jupitert elsőként a Pioneer 10 és 11 szondák látogatták meg 1973-74-ben, majd a két Voyager 1979-ben. 1995 óta kering a Galileo szonda a bolygó körül. Ez utóbbi küldetés egy a Jupiter légkörébe merülő szondát is tartalmazott, melynek mérései olyan meglepő eredményeket adtak, hogy még ma is vita tárgya, hogy vajon a bolygó egy nem elég reprezentatív részén szállt alá, vagy az eddigi képünket kell átformálnunk a valóság megismeréséhez. A Szaturnuszra tartó Cassini űrszonda 2000 decemberében tett látogatást a Jupiternél, s végzett a Galileoval párhuzamos méréseket.

A Galileo szondájának helyszíni mérései alapján a Jupiter látható felszíne alatt megnövekszik a szélsősebesség. Az eredeti 100 m/s-ról 180 m/s-ra nő.

A Jupiter Déli Egyenlítői Sávjában feltűnő, kiterjedt, ellipszis alakú foltot nevezünk Nagy Vörös Foltnak (GRS - Great Red Spot). A bolygó felhőzetének más, hamar eltűnő foltjaitól eltérően ez a képződmény állandónak mutatkozik. Bár helyzete, mérete alakja, s színe a környező felhősávokhoz képest változik, már 300 évvel ezelőtt is készültek róla megfigyelések. 1878 óta folyamatos észlelési sorozatok állnak rendelkezésre, melyekből kiderül, hogy a GRS megtorpanásokkal, sőt visszafordulásokkal ugyan, de a felhősávhoz viszonyítva kelet felé tolódik, és mintegy körbejárja a bolygót.

A GRS magasabban fekszik, mint környezete. A folt olyan, akár egy hatalmas vihar. Anticiklonáris - azaz a Déli félgömbön az óramutató járásával ellentétes - mozgást végez. Az utolsó száz évben egyre-másra születtek az elméletek a GRS megmagyarázására. Ilyen például a tojásemélet, azaz egy többé-kevésbé szilárd test úszik a légkörben, vagy a gázoszlop elmélet, mely szerint a folt egy talán kráterből kiáramló gázoszlop teteje.

A Szaturnusz, az Uránusz és a Neptunusz is övező mintázatú, valamint foltokat is figyeltek meg rajtuk. A Szaturnuszon volt egy fehér ovális alakú képződmény, a Nagy Fehér Folt. A Neptunuszon pedig egy Nagy Sötét Folt ékeskedik.

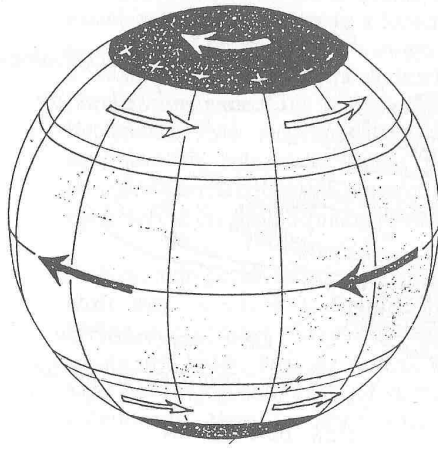


A Voyager 1978-ban küldött fényképei erős szeleket és színes örvényeket fedeztek fel. A látványos részletek láttán a csillagászok magát a foltot örvénylő áramlások hurrikánszerű rendszerének látták, amely félretolja a bolygó körüli vízszintes sávokat alkotó kelet-nyugati szélzónák övcit. Viszont a földi hurrikánok ciklon irányban forognak, s néhány napon belül elülnek.

5. A FÖLDI LÉGKÖR HIERARCHIKUS DINAMIKÁJA

A bolygók légkörében légtetek (légtömegek) mozognak. A légtetek mozgásai mintázatot alkotnak. Ezek jól elkülönülnek méretük és élettartamuk szerint. A mintázat kialakításában a bolygók nagysága és forgása, a légkör szerkezete, a légtetek mérete és eltérő felmelegedése a meghatározó. Az egyes bolygók légkörében kialakuló különböző skálájú folyamatok együttese formálja az ottani általános cirkulációt a kis örvényektől, portölcséréktől, a bolygó egészére kiterjedő rendezett mozgásokig.

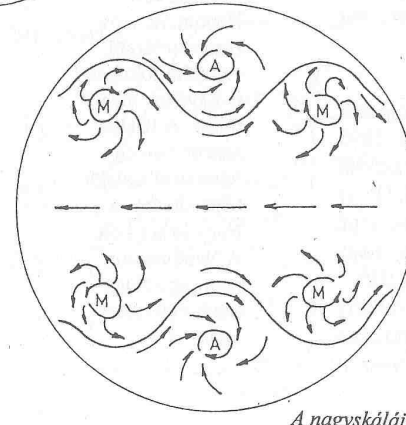
Az általános cirkulációt, a légtetek mozgását, egy energia átalakulási lánc „hajtja”. Ennek elsődleges energiaforrása a belső bolygókon a Nap, a külső bolygókon pedig a bolygótetek belsejéből áramló energiák. A nagyon lassú forgású Vénuszon a Nap felőli oldalon alakul ki egy sugarasan szétáramló egyszerű cirkulációs rendszer. A gyorsan forgó bolygók – mint a Föld – légkörében nem alakulhat ki egycellás cirkuláció. Ez ellentmond az impulzusmomentum megmaradás tételének is. A forgás miatt fellépő Coriolis-erő eltéríti az áramlásokat, kialakítva a keleties és a nyugatias szélöveket. A légköri áramlásokban résztvevő, a légtetekben mindig jelenlevő folyadék vagy por részecskék jól kirajzolják az áramlási mezőt a különböző hullámhosszakon készített műhold felvételeken. Ezek az áramlási cellák mutatkoznak meg akkor is, amikor sávosnak észleljük az óriásbolygókat. Elsőként ismerkedjünk meg a Föld légkörében kialakuló nagytérségű (több ezer km-es léptékű) áramlási képpel!



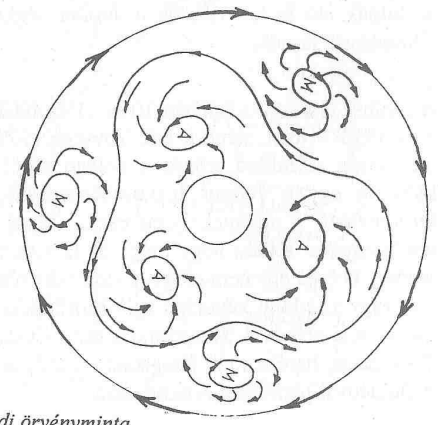
Az örvényminták kialakulásának sematikus képe.



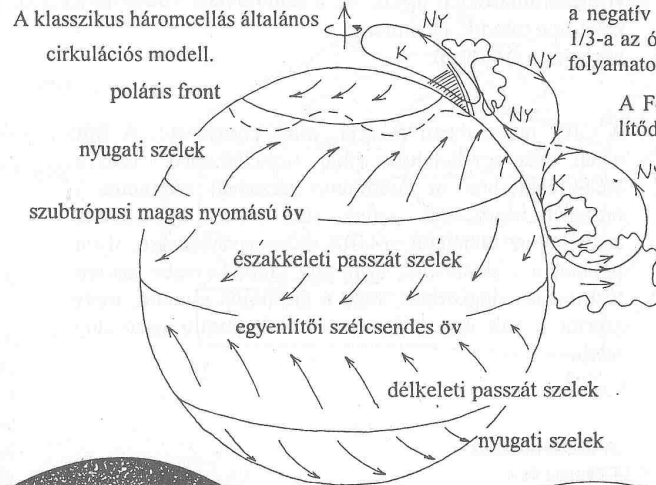
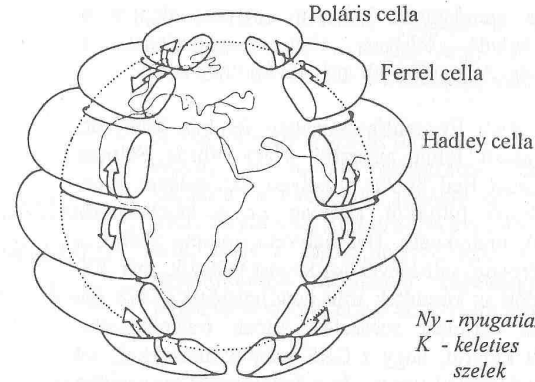
Az örvényminták kialakulásának sematikus képe.



A nagyskálájú földi örvényminta



az Egyenlítő felől nézve, az északi pólus felől nézve.



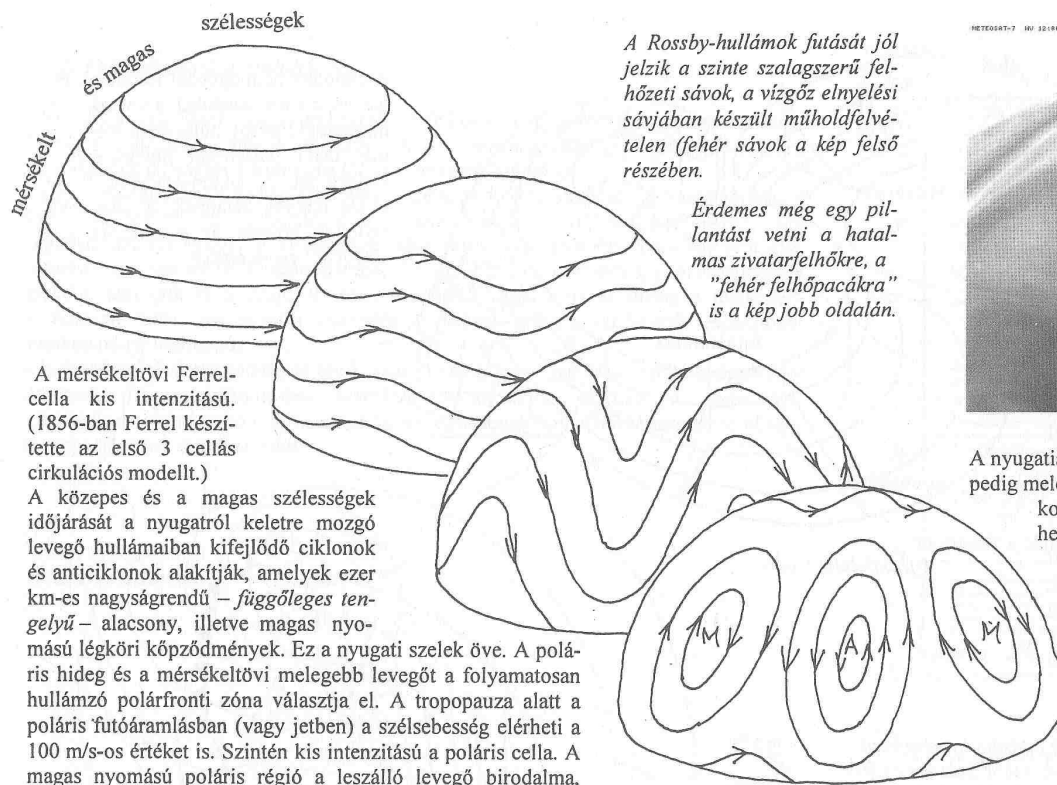
5.1. A Föld nagyméretű áramlási rendszere

5.1.1. Az általános cirkulációs cellák

A légkör alsó tartományaiából kiinduló és a légkör egészére kiterjedő globális méretű mozgások hajtóerejét a napsugárzás adja, amely a Föld keringése, forgása és tengelydőlése miatt nem éri mindenütt egyformán a felszínt. Nagy hőmérsékleti kontraszt alakul ki az Egyenlítő és a sarkok között. A légtetek közötti hőmérséklet-különbség potenciális energiát jelent. Az általános cirkuláció ezt a potenciális energiát folyamatosan mozgási energiává alakítja át, amit a súrlódás a mozgásrendszerek lebomlása, leépülése révén folyamatosan felemész. Az általános cirkuláció biztosítja a tömeg, a nedvesség, az impulzusmomentum és a hő szállítását. A hideg levegő az Egyenlítő, a meleg levegő a Pólus fele szállítódik, hiszen a trópusi terület a pozitív sugárzási mérleg ellenére nem melegszik, míg a mérsékelt és magas szélességek területe a negatív sugárzási mérleg ellenére sem hűl. Az energia-szállítás több mint 1/3-a az óceáni áramlásokban, közel 2/3-a a légkörben történik. Mi a légköri folyamatokkal foglalkozunk.

A Földön a hideg sarki és a meleg egyenlítői légtet közötti kiegyenlítés két lépésben történik. Az alacsony szélességeken a Hadley-cella uralkodik. Hadley volt az első, aki 1735-ben cirkulációs modellt készített. Az utókor róla nevezte el az *egyenlítői horizontális tengelyű cirkulációs cellát*. Az Egyenlítő és a térítőkörcök között mindkét féltekén a keleties passzát szelek fújnak.

Az Egyenlítő környékén a felszálló levegőben hatalmas felhőképződmények alakulnak ki. Mindennaposak a heves zivatarok. A magasban a pólusok fele induló levegőt a Coriolis-erő eltéríti s a térítőkörcök környékén a magasban már erős nyugatias szelek uralkodnak (szubtrópusi futóáramlás v. jet). A leszálló mozgásra kényszerülő levegő miatt egy magasnyomású öv futja körbe a Földet, itt vannak a nagy sivatagok.



A Rossby-hullámok futását jól jelzik a szinte szalagszerű felhőzeti sávok, a vízgőz elnyelési sávjában készült műholdfelvételen (fehér sávok a kép felső részében).

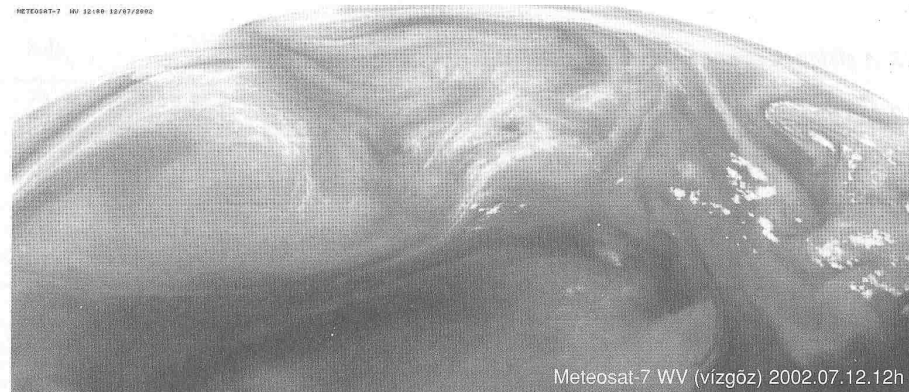
Érdeemes még egy pillantást vetni a hatalmas zivatarfelhőkre, a "fehér felhőpacákra" is a kép jobb oldalán.

A mérsékeltövi Ferrel-cella kis intenzitású. (1856-ban Ferrel készítette az első 3 cellás cirkulációs modellt.)

A közepes és a magas szélességek időjárását a nyugatról keletre mozgó levegő hullámaiban kifejlődő ciklonok és anticiklonok alakítják, amelyek ezer km-es nagyságrendű – függőleges tengelyű – alacsony, illetve magas nyomású légköri köpződmények. Ez a nyugati szelek öve. A poláris hideg és a mérsékeltövi melegebb levegőt a folyamatosan hullámzó polárfronti zóna választja el. A tropopauza alatt a poláris futóáramlásban (vagy jetben) a szélsősebesség elérheti a 100 m/s-os értéket is. Szintén kis intenzitású a poláris cella. A magas nyomású poláris régió a leszálló levegő birodalma, gyakori az anticiklon, de találkozhatunk ciklonokkal is.

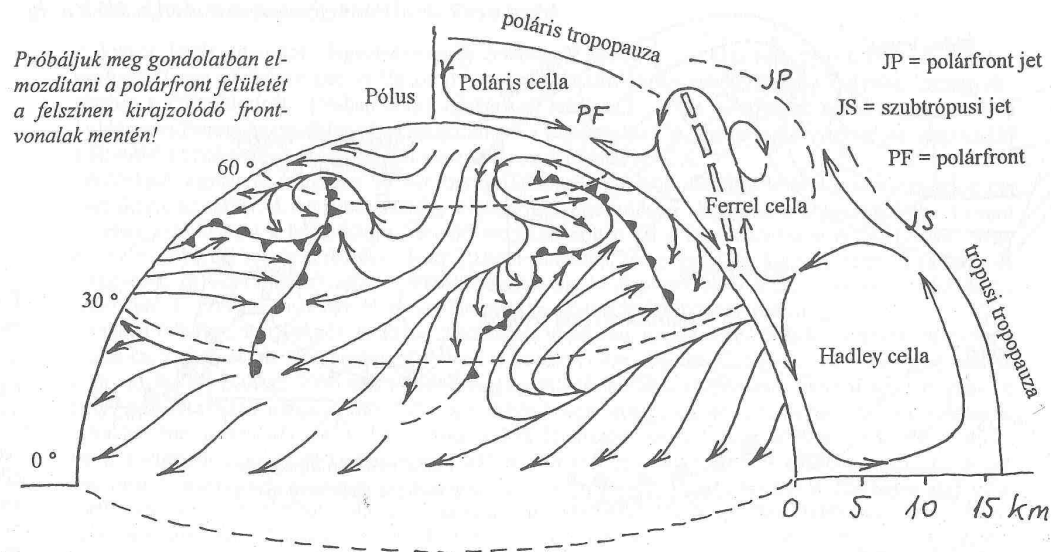
5.1.2. A Rossby-hullámok fejlődése

A mérsékeltövi áramlási rendszer fejlődését a horizontális instabilitások kormányozzák. 3-5 különböző fejlődési állapotú 6-8 ezer km-es karakterisztikus méretű horizontális hullám futja körül a Földet a mérsékeltövi meleg és a poláris hideg levegő határán. Ezek az ún. Rossby-hullámok. Fejlődésükben a horizontális hőmérsékleti különbségek (a levegőtömegek eltérő felmelegedése) és az ebből származó nyomási erő, illetve a Föld forgásából származó Coriolis-erő játszik szerepet. Ez a nagyskalájú turbulens mozgás sajátja a légkörnek, minden külső hatás nélkül is kialakul. A hullámok általában keleti irányba haladnak, és biztosítják a hő és az impulzusmomentum szállítását is. Négy fejlődési fázisukat Namies (1950) munkája alapján ismertetjük. Az ábrsorozat izovonalait úgy képzelhetjük el, mint egy forgó kádban a folyadék magasságát, ami helyről helyre változik völgyeket (alacsony nyomás) és púpokat (magas nyomás) rajzolva. Itt a felső troposzféra áramlási rendszerét szemlélítjük, 6-10 km-es magasságban. Az északi oldalon, a hideg levegőben, a nagyobb sűrűség miatt jobban csökken a nyomás a magassággal, mint a délen levő könnyebb, meleg levegőben. Ezért a felső troposzférában a kis szélességeken találjuk a magas nyomású, míg a nagy szélességeken az alacsonyabb nyomású zónát. Ez magyarázza – a Föld forgásából származó Coriolis-erő hatásával együtt – a nyugatias alapáramlást (első fázis).



A nyugatias alapáramlás nem stabil, hiszen ekkor az északi területek folyamatosan hűlnének, a déliek pedig melegednének a sugárzástartás övezetes eloszlása miatt. Nőne a hőmérsékleti és a nyomási kontraszt. A nyomási erő hatására északra elmozduló légréteg nem tér vissza eredeti helyzetébe, „hullámot vet”. A zonális nyugati alapáramlásra ráakadódik egy gyorsan növekvő amplitúdójú hullámmozgás (2-3. fázis). E hullám kimélyülését, a hullámokban megjelenő alacsony- és magasnyomású képződmények – vagyis a ciklonok és anticiklonok – megszületését, fejlődését és az örvények (a Rossby-hullám) leépülését szemlélteti az ábrsor. A különböző fejlődési fázisok egymás mellett vannak jelen.

Az alsó ábra összefoglalja a 3 cirkulációs cella sajátosságait: a cellák elhelyezkedését, a tropopauza magasságát, a két nyugatias szélmaximum, a szubtrópusi és a poláris futóáramlás (v. jet) helyét, a meleg és a hideg levegőt elválasztó, az egész földet körülölelő polárfont (v. poláris front) helyzetét, a frontfelületek felszíni képét.

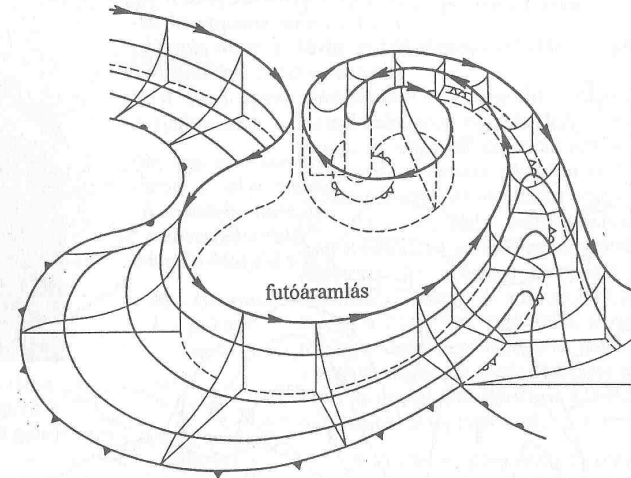


5.2. A ciklonok és anticiklonok

5.2.1. A polárfront-elmélet

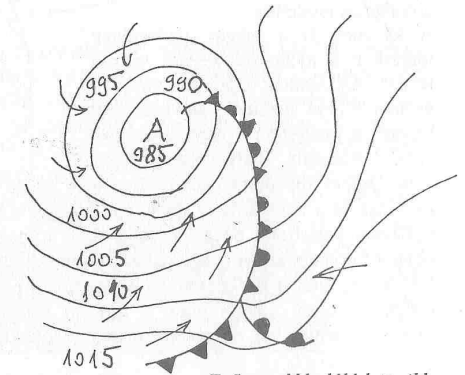
A mérsékeltvízi ún. hullámciklonok fejlődését a múlt század húszas éveiben született polárfront elmélet írja le. Kövessük a meleg és a hideg levegőtömeget elválasztó frontfelületnek, az ún. polárfrontnak a mozgását, hullámozását! Nézzük meg a kifejlődő tengerszinti légnyomási mezőt! A polárfront északi részén található a hideg, míg délen a meleg levegő. Ha a frontok vertikális szerkezetét nézzük, akkor alul helyezkedik el a sűrűbb hideg levegő, míg felül a ritkább meleg levegő.

A frontfelület felszínrel való metszéspontját szinoptikus térképeken ábrázoljuk. Ezek a mindenki által jól ismert frontvonalak. A frontokat többféleképpen osztályozhatjuk. Melegfrontról beszélünk, ha a meleg levegő foglalja el a hideg levegő területét, míg hidegfrontról, ha a hideg levegő tör be a meleg levegő helyére. Beszélünk még álló v. stacionárius frontról is. A meleg levegő mozgása alapján megkülönböztetünk felsikló és lesikló frontokat, attól függően, hogy milyen irányban mozog a meleg levegő a frontfelületen. A Rossby-hullám kimélyülésével egyre markánsabbá válik a felszíni nyomási kép. Kialakulnak a zárt izobárok, megszületik a ciklon, benne a hideg- és a melegfronttal. (Megjegyezzük, hogy a ciklonok tengelye dől, vagyis nem ott van a ciklon középpontja a felszínen, ahol a magassági hullámban megfigyelhető.) A meleg levegő birodalmát, a hideg- és a melegfront közötti területet melegszeletornak, míg a ciklon másik, nagyobb (északi) területét hidegszeletornak nevezzük. A hidegfront gyorsabban mozog mint a melegfront. Így a hideg levegő utoléri a meleg levegőt. A két levegőtömeg választófelülete már nem érintkezik a talajjal. Elkezdődik a ciklon „öregedése”, kialakul az ún. okklúziós (emelt) front. A melegszeletornak, a tropopauza alatt kigyózó futóáramlás is bonyolult alakot vesz fel.



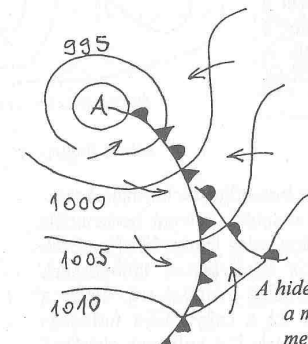
A frontfelület lejtése.

A ciklonok nem egyedül fordulnak elő, hanem cikloncsaládokat alkotnak. Egy magassági Rossby-hullámban több egymás utáni polárfronti hullámvetés is kialakulhat. A ciklon-családok északi irányba haladnak, a „fiatalabb” ciklonok követik az északabbra levő „öregebb” rendszereket.



Erősen okkludálódott ciklon. A ciklon leépül, feltöltődik. Erős az összeáramlás, a felhőzet spirális alakú.

A felhőzeti mező követi a frontvonalak futását. A melegfront előtt, illetve a hidegfront mögött találjuk a több száz km-es felhőzeti mezőt. Az okklúziós front mindkét oldalán felhős az ég.

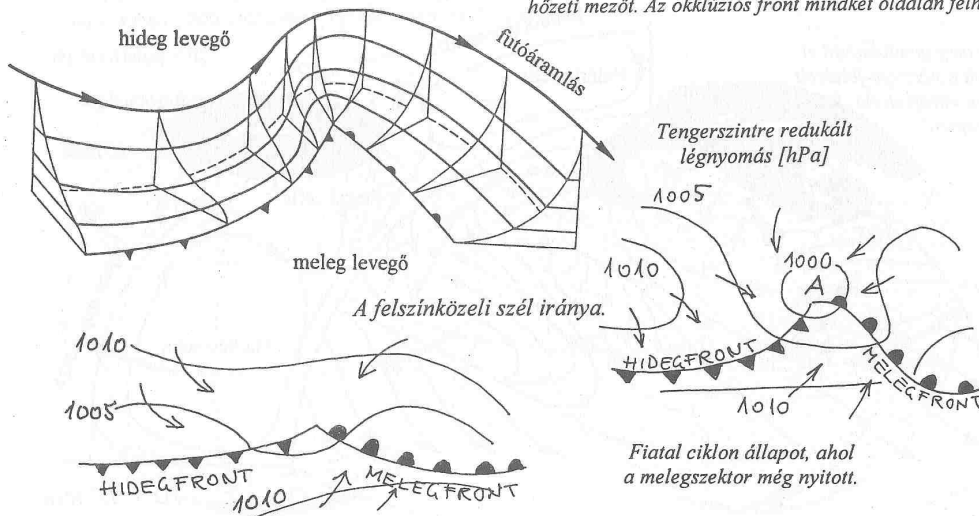


Kezdődő okklúzió. A hideg levegő utoléri és megemeli a meleg levegőt, elkezdődik a melegszeletor összeháródása.

Érdekességként megemlíjtük, hogy a mérsékeltvízi ciklonok, mint a környezetüknél hidegebb, míg az anticiklonok, mint a környezetüknél melegebb képződmények jelentkeznek.

A több száz km-es karakterisztikus méretű, meleg óceáni felszínre felett keletkező trópusi ciklonok kialakításában már a függőleges instabilitás (a felhajtóerő) a meghatározó. Szimmetrikus képződmények, melegebbek a környezetüknél és nincsenek bennük frontok.

Az anticiklonokat több csoportba oszthatjuk. Lehetnek pl. a ciklonális rendszerek között elhelyezkedő ún. köztes anticiklonok, egy-egy cikloncsalád után kifejlődő lezáró anticiklonok, vagy a nagyskálájú leszálló mozgások eredményeként kialakuló szubtrópusi magasnyomású képződmények. Fontos tudni, hogy anticiklonokhoz nem kapcsolódnak frontok. A magasnyomású anticiklon jellemzője a leszálló mozgás, ami „felhősztató” hatású.



Kezdeti szakasz. A polárfront hullámozat vet.

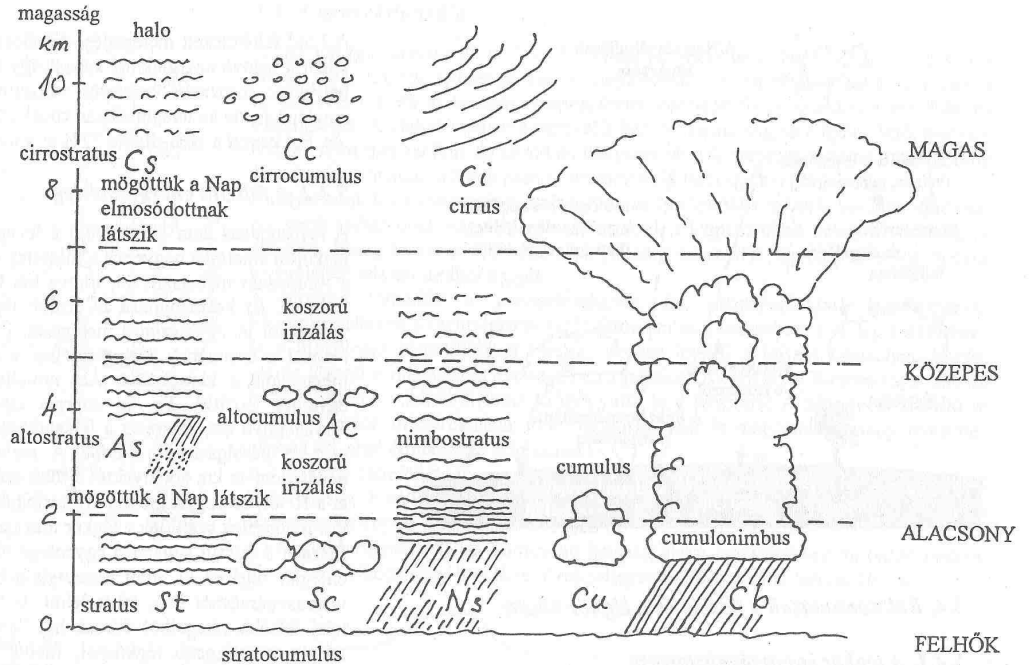
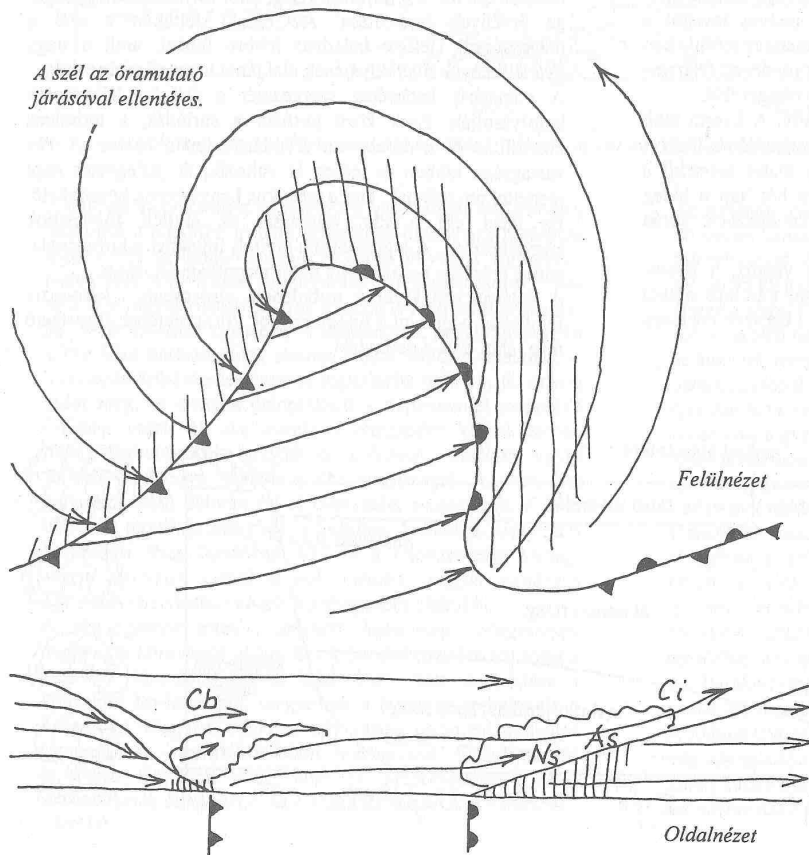
Fiatal ciklon állapot, ahol a melegszeletor még nyitott.

5.2.2. Frontálzónák a ciklonban

Tekintsük át egy fiatal ciklon szerkezetét. A felhő- és csapadéköna a melegfront előtt, illetve a hidegfront mögött húzódik. A frontálzónák mindig nyomási teknőben helyezkednek el, vagyis a frontvonaltól távolodva nő a nyomás.

A lassan mozgó felsikló melegfront réteges szerkezetű felhőzetből áll. A frontálzóna előtt több száz km-re már megjelenik a vonalba rendezett ún. „cirrus ernyő”, ami folyamatosan vastagszik. A középmagas altostratus felhőzeten már nem süt át a nap, szitálásra, gyenge esőre is számíthatunk. Az altostratus-ból kihulló kis vízecspepecskék gyakran nem érik el a talajt. Ilyenkor mondják, hogy „veri az ördög a feleségét”. A hosszan tartó, melegfronti csapadék a vastag réteges szerkezetű esőfelhőből (nimbostratus) származik.

A hidegfront felhőzete gomolyos szerkezetű. Az alsó ábrán egy erős, lesikló hidegfrontot láthatunk. Itt a szélnyírásból származó zivatarfelhők okozzák a csapadékot. A hidegfrontnak nagyobb a lejtése, mint a melegfrontnak, így a hozzá tartozó felhőzeti- és csapadékmező is keskenyebb.



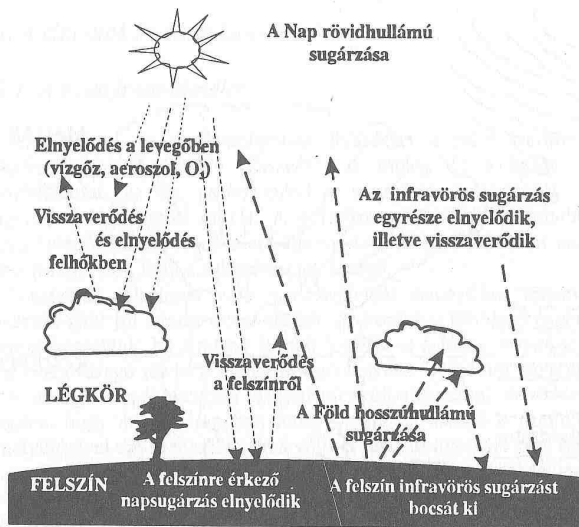
5.3. A felszínről megfigyelhető jelenségek

5.3.1. A felhők osztályozása

A légkör leglátványosabb, legváltozatosabb jelenségei kétség kívül a felhők. Nincs két nap, amikor egyforma lenne a felhőzeti kép. A légkör víztartalma a felszínről párolgás során jut a légkörbe, legnagyobb részben a Föld felszínét 71%-ban borító óceánokról származik. A víz az egyetlen olyan anyag, amely a Földön mindhárom halmazállapotban megtalálható a természetben. A légkör teljes víztartalma megközelíti a félmillió köbkilométert és hozzávetőlegesen 10 nap alatt kicserélődik.

Földünknek egyszerre átlagosan 54%-át borítja felhőzet. A felhők megfigyelésével már évszázadok óta foglalkozik az ember. A ma is használatos felhőosztályozási rendszer alapjainak kidolgozása Luke Howard nevéhez fűződik, aki a botanikához hasonló rendszert épített fel a felhők elnevezésére 1813-ban. Négy alapvető csoportba sorolta a felhőket: *bála-* (latinul cumulus), *réteg-* (stratus), *hajtincs-* (cirrus) *alakúak*, és a negyedik, az *esőt* (nimbus) *adók*. A meteorológusok ma 10 alapvető felhőnemet, az azokból kialakuló 26 felhőfajtát, és azoknak további több tucat változatát és módosulatát különböztetik meg.

Azokat a felhőket, amelyeknek az alapja 5000 méter fölött van, magas szintű felhőknek nevezzük. Ilyen a szálas szerkezetű *cirrus* (Ci), a bárányfelhőnek is becézett *cirrocumulus* (Cc) és a *cirrostratus* (Cs), vagyis a fátyolfelhő. A 2000 és 7000 méter között megfigyelhető felhők a középmagas kategóriába tartoznak: a tartós esőzessel járó *nimbostratus* (Ns), a szürkés-kékes réteget alkotó *altostratus* (As) és a szürkés foltokból álló *altocumulus* (Ac). Az alacsony szintű felhőket a talajfelszín és 2000 méter között találjuk. Ilyen a lehangoló, ólmosszürke borultságot adó *stratus* (St) és a világosabb és sötétebb szürke foltokból álló *stratocumulus* (Sc). Az utolsó két felhőnem a nagy függőleges kiterjedésű felhők csoportját alkotja: a karfiolhoz, vagy teljszínhab-halomhoz hasonló *cumulus* (Cu), és a gyakran üllő alakban végződő, ézengést, sőt időnként jégesőt és szélvihart is előidéző zivatarfelhő, a *cumulonimbus* (Cb) amit a „felhők királynőjeként” is szoktak emlegetni.



5.4. Kölcsönhatások a felszín és a légkör között

5.4.1. A légkör sugárzásháztartása

A légköri folyamatok elsődleges hajtómotorja a Napból jövő energia. Ennek nagy része hozzávetőlegesen 43%-a a felszínen elnyelődik, szintén jelenős a visszavert sugárzás (30%), ami a föld-légkör rendszer albedója. A légkör és a felhőzet az energia 27%-át nyeli el. Minden test hőmérsékletének megfelelően kisugároz. A Föld légkör-rendszer ugyanannyi energiát sugároz ki, mint amennyit kap, csak ezt más hullámhosszon teszi. A hosszuhullámú kisugárzás (10 μm -es maximummal az infravörös tartományban) a Föld egészéről (a teljes felületről) folyamatosan történik, míg a rövidhullámú besugárzás (0,55 μm -es maximummal a látható tartományban) a Föld vetületére érkezik. (Egy gömb felülete a vetület területének négyszerese.)

Nemcsak a Földfelszín, hanem a légkör is kisugároz, kialakítva az üvegházhatást. Az üvegházhatás lényege, hogy a felszínről induló infravörös kisugárzás jelentős részét a légkör üvegház-hatású gázai (ilyen pl. a vízgőz, a szén-dioxid, a dinitrogén-oxid, a metán és az ozon) újra és újra visszaverik, miáltal nő a talajra érkező sugárzás. Ez a magyarázata annak, hogy a Föld 15 °C-os középhőmérséklete hozzávetőlegesen 33 °C-kal nagyobb, mint amennyit a Naprendszerben elfoglalt helye indokolna. Természetesen évi átlagban a föld-légkör rendszer külső határára érkező és onnan távozó sugárzási energia megegyezik.

A Föld feltételezett melegedése mindössze kis energiátárolást jelent a bejövő energiákhoz képest, így a folyamat egyensúlyi helyzetek sorozatán keresztül valósulhat meg. Akármilyen meglepő is, de az üvegházhatás közel 2/3-át a vízgőz a felelős. Ezt követi a szén-dioxid 22% és a troposzférikus ozon 7%.

5.4.2. A felszíni energiamérleg

A napsugárzás nem közvetlenül a levegőt melegíti, hanem a légkörön áthatolva nagyrészt a földfelszínen nyelődik el. Tehát a földfelszín melegszik fel, illetve hűl le a be- és kisugárzás hatására. Ez kormányozza az alsóbb légrétegek hőmérsékleti viszonyait is. A felszíntől melegszik, illetve hűl le a levegő. Nappal a besugárzás következtében a felszínre jutó energia meghaladja a kisugárzást. Azt mondjuk, hogy a sugárzási egyenleg pozitív. Ez az energia egyrészt a talajba jut, felmelegítve azt, másrészt a felszínközeli levegő felmelegítésére és párolgásra fordítódik. A meleg, nedves levegőt a néhány cm-es kis örvényektől a több száz méteres termikeken át a 10 km-es nagyságrendű zivatarfelhőkig rendezett feláramlási rendszerek szállítják a légkör magasabb rétegei felé.

Éjszaka a felszín sugárzási egyenlege negatív. A felszín több energiát sugároz ki, mint amennyit a hosszuhullámú légköri visszasugárzásból kap, tehát lehűl. E folyamatot mérsékli a talaj felsőbb rétegeiből érkező hő. Szintén hőt kap a hideg felszín a melegebb légkörből, illetve a kondenzáció során (pl. harmatképződés).

A felszínen kezdődik és fejeződik be a vízgőz, a nyomanyagok, illetve az energia légköri ciklusa. Párolgás nélkül nem lennének felhők, nem lenne csapadék, s egészen másképp nézne ki az általános cirkuláció.

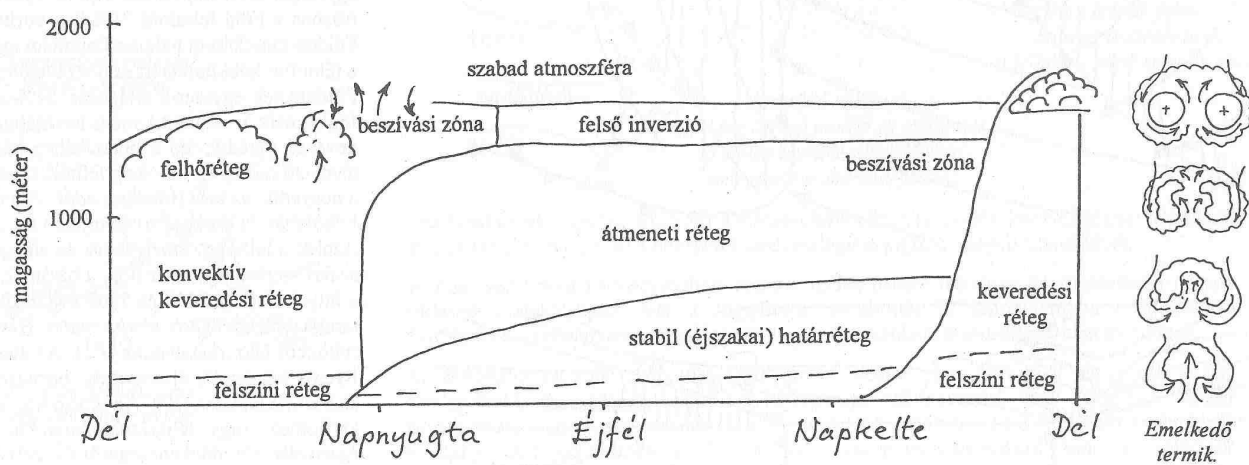
5.4.3. A planetáris határreteg

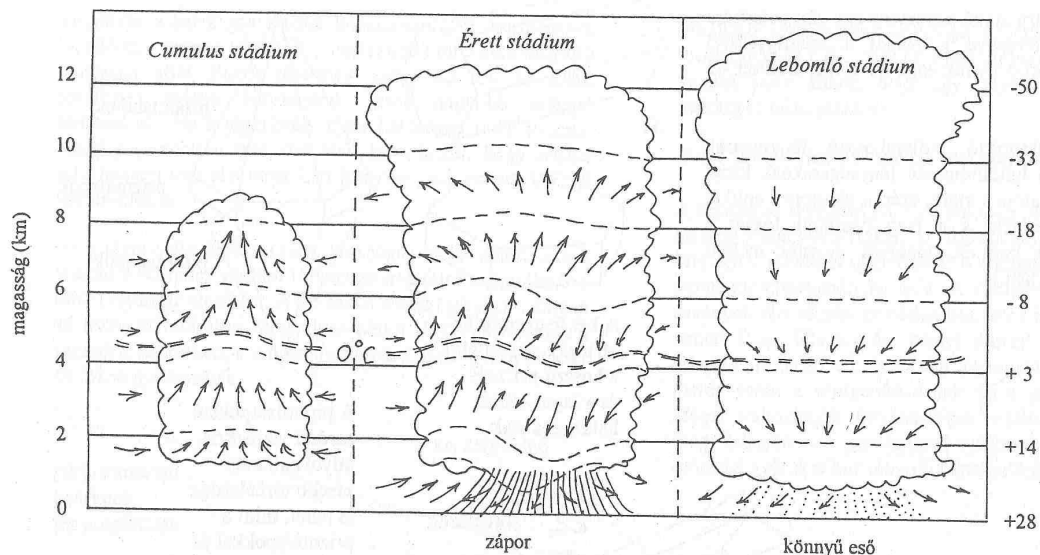
A légkörnek azt a rétegét, amelyet közvetlenül módosít az alatta elhelyezkedő földfelszín, planetáris határretegnek (Phr) nevezünk, vastagsága 0,2-2 km. A planetáris szó arra utal, hogy e réteg minden légkörral rendelkező égitesten megtalálható és a fizikai elvek hasonlósága miatt hasonló módszerrel kutatható. Így nem véletlen, hogy a marsi légkör kutatásában is kiemelkedő helyet foglal el az ottani felszín energetikai vizsgálata és a kialakuló turbulens mozgások mérése és modellezése.

A Phr szerkezetét a mechanikai és a termikus eredetű turbulens örvénytestek alakítják. E felszíni kényszerekre a határreteg órák, vagy ennél rövidebb időskálán reagál. A Phr alsó része a felszínközeli réteg, ahol a turbulens áramok állandóságával számolunk. Itt a „súrlódás az út”. Efelett található az ún. szélfordulási réteg, ahol folyamatosan gyengül az örvények intenzitása. Az északi féltéken a szél a magassággal (felé haladva) jobbra fordul, amit a nagy gyárkémények füstfáklyájának alakjánál is megfigyelhetünk.

A planetáris határreteg szerkezetét a felszíni kényszerek befolyásolják. Ezek közé tartozik a súrlódás, a turbulens hőszállítás és a domborzat áramlásmódosító hatása. A Phr vastagsága időben és térben is változik, de jellegzetes napi menettel rendelkezik, ami a termikus kényszerek köszönhető. Ez idézi elő a Phr változását az átviteli folyamatok közvetítésével. A legfontosabb átviteli folyamat a turbulencia; ennek erőssége befolyásolja a Phr magasságváltozását.

A határretegen kívül a turbulencia elsősorban a konvektív felhőkben, valamint a futóáramlások környezetében figyelhető meg, ahol erős a szélnyírás.





A légtömegben belüli zivatarcella fejlődése. Nézzük az aszimmetrikus hőmérsékleti mezőt!

A nappali vagy *konvektív határréteg* vastagságát elsősorban a felszínről a légkörbe történő hőszállítási intenzitása határozza meg. A Phr-be történő hőszállítási kettős folyamat. Egyrészt a meleg felszínről induló örvénytestek felemelkedésével, másrészt a felhőtető kisugárzásával, a hideg levegő lesüllyedésével jár. E két folyamat egyszerre is lejátszódhat, például akkor, ha a Phr felső határán hideg stratocumulus felhőzet található. A konvekció felhőmentes esetben napfelkelte után kb. fél órával indul meg, és energia utánpótlását a naplementét megelőző órákban veszti el. Az instabilis rétegződés következtében meleg légbuborékok hagyják el a felszínt, amelyek egyre följebb emelkedve növelik a Phr magasságát. A planetáris határréteg késő délután éri el maximális vastagságát. Felhős időben a termikus energiája is csökken. Ezekben a napokon a keveredési réteg lassabban nő. Ha a felhőzet elég vastag, akkor termikus turbulenciától mentes, vagyis semleges egyensúlyi helyzethez közeli légrétegződés alakul ki.

A semlegeshez közeli *átmeneti határréteg* jellegzetesen napnyugta környékén alakul ki. A termikképződés napnyugta előtt kb. fél-másfél órával leáll. Nem lesz utánpótlása a konvektív örvényeknek, megszűnik a termikus turbulencia a keveredési rétegben. Kialakul egy vastag turbulencia-mentes (pontosabban egy maradvány mechanikus turbulenciával jellemzett) átmeneti réteg, ahol az állapotváltozók és a koncentrációk átlagértékei az éjszaka folyamán alig változnak.

Az átmeneti réteg nem áll közvetlen kapcsolatban a földfelszínnel. Az este folyamán megszülető éjszakai stabil Phr folyamatosan nő, emelve az átmeneti réteg alsó határát. Felépül a *stabilis éjszakai határréteg*. Ennek jellemzője a gyenge, szórványos turbulencia, illetve a gravitációs hullámok (vertikálisan elmozduló stabilis levegőtöttek) keltette örvények. A sűrűdés miatt gyengül a felszíni szél, a felsőbb szinteken viszont erősödhet. Kialakulhat az ún. éjszakai, vagy alacsony szintű futóáramlás (jet) is. A stabilis levegő elnyomja, míg a kifejlődő éjszakai jet szélnyírása elősegíti a turbulenciát.

5.5. A konvektív skála

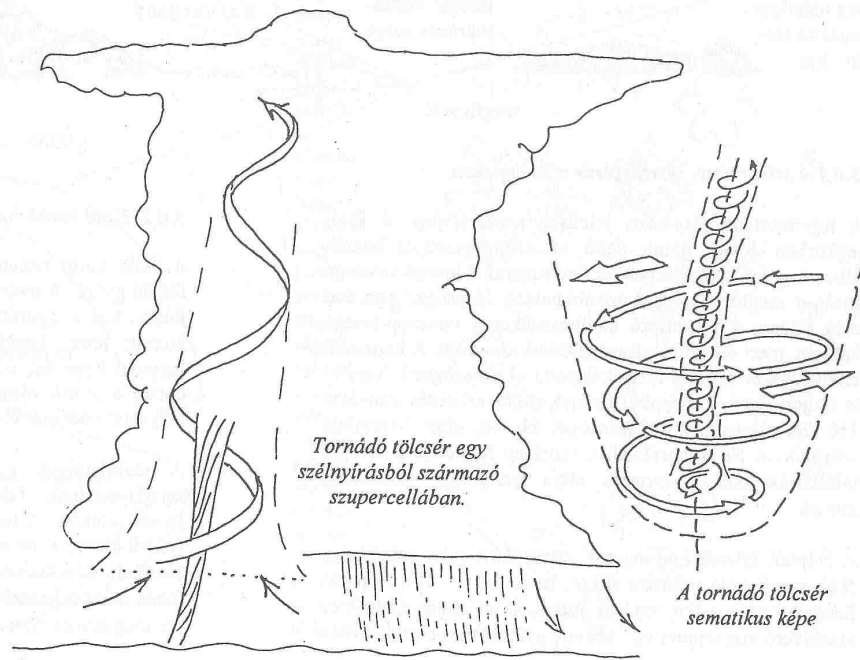
A nagytérségű folyamatok (5.1. és 5.2.) után ismerkedjünk meg a néhány 10 km és a cm-es skála közötti jelenségekkel. E folyamatok – ellentétben a több ezer km-es horizontális méretű és az egész troposzférára kiterjedő folyamatokkal – már háromdimenziósak. Kialakulásukban a vertikális instabilitások, vagyis a felhajtóerő, illetve a felszín, mint mechanikus és termikus kényszer játszik szerepet. Élettartamuk néhány órától (viharvonalak) néhány percig, másodpercig tart (egy kis portölcsér).

E folyamatok közé tartoznak a több tíz km-es horizontális méretű, vonalba rendezett zivatarok (viharvonal, vagy squalline), amelyek a legpusztítóbb balatoni viharokat is okozzák. Energiájukat a vertikális szélnyírásból és az alsó légrétegek meleg nedves levegőjének feláramlásából kapják.

A pusztító tornádók is zivatarfelhőkhöz, ún. szupercellákhoz kapcsolódnak. Megszületésükben a szélnyírásból (erős futóáramlás a magasban, a meleg szektorban) és a függőleges instabilitásból (meleg, nedves levegő a felszín közelében, hűvös, száraz levegő a magasban) nyerik az energiájukat. Az intenzív forgómozgás okozta tornádó tölcser a felhőből indul ki és nyúlik le a felszínre. A néhány 10 és 100 m közötti tornádó tölcserék akár több 10 km-es utat is megtehetnek nagy pusztítást okozva ott, ahol érintkeznek a felszínnel.

A zivatarok létrejöhetnek egy légtömegben belül is. Itt a kis szélnyírás és az erős feláramlás a kiváltó ok. Erős feláramlással, konvektív felhőzettel találkozunk a Hadley-cella trópusi feláramlási részében is.

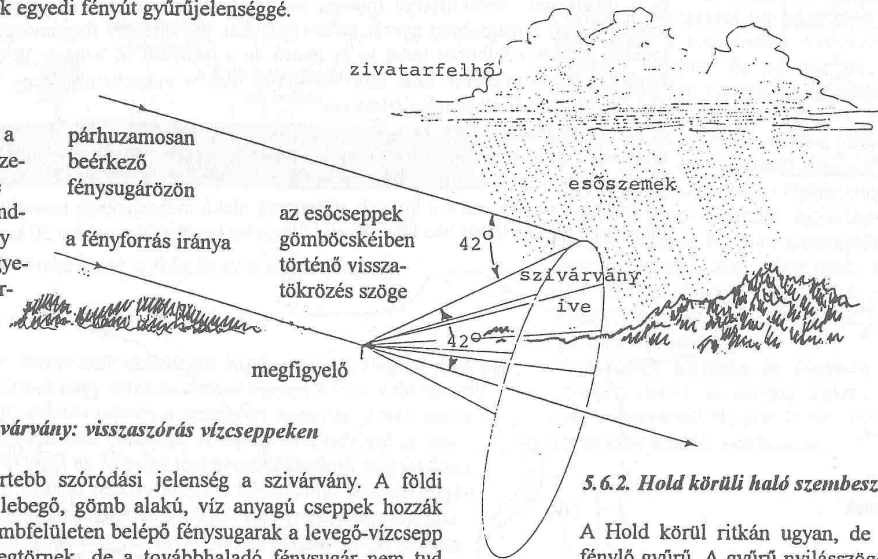
Az óceáni területek felett a konvekció hatszög alakú méhsejtekhez hasonló nyitott, illetve zárt felhőcellákat hoz létre. Ezek jellegzetes horizontális mérete 50 km.



5.6. A fényforrás fényének törése és szóródása nagy darabszámú optikai szemcsén

A történelem során sok érdekes légköri fényjelenséget jegyeztek föl. Ezek többsége a Naphoz kapcsolódik. De a légkörben előforduló szórási jelenségek közül kettő olyan, amit szinte mindenki láthatott már életében. Mindkét jelenséget a légkörben lebegő optikai tulajdonságú szemcsék hozzák létre. A légkörben leggyakrabban vízcseppek vagy jégkristályok lebegnek. A hozzájuk kapcsolódó szórási jelenséget két szinten írjuk le. Az egyik - a lokális - szint a fény áthaladása az egyes részecskéken, a másik a légkörben lebegő szemcsé sokaság globális szintje, vagyis hogyan adódhat össze a sok egyedi fényt gyűrűjelenségé.

A szivárvány középpontja a megfigyelőt és a fényforrást összekötő egyenesre esik. Ezért mondhatjuk azt, hogy minden megfigyelő a saját szivárványát látja.



5.6.1 A szivárvány: visszaszórás vízcseppeken

A legismertebb szóródási jelenség a szivárvány. A földi légkörben lebegő, gömb alakú, víz anyagú cseppek hozzák létre. A gömbfelületen belépő fénysugarak a levegő-vízcsepp határon megtörnek, de a továbbhaladó fénysugár nem tud még kilépni a következő találkozásakor a vízcsepp-levegő határára, mert ott teljes visszaverődést szenved. A harmadik találkozásakor éri el a fázisok határát olyan szögben, hogy ki is tudjon lépni a cseppből. Iránya ekkor a beesés irányával 180 fok minusz 42 fokos szöget zár be, azaz "visszafelé" szóródik. A fénysugaraknak a vízcsepp felületekkel történő találkozásaiakkor a mozgás síkja mindvégig változatlan marad.

A Napból érkező fénysugarak szivárványt rajzolnak ki egy földi megfigyelő számára akkor, ha az háttal áll a Naphoz. Szemébe azok a fénysugarak juthatnak el, amelyek törő és visszaverő vízcseppeji egy vékony gyűrű alakú tartományban

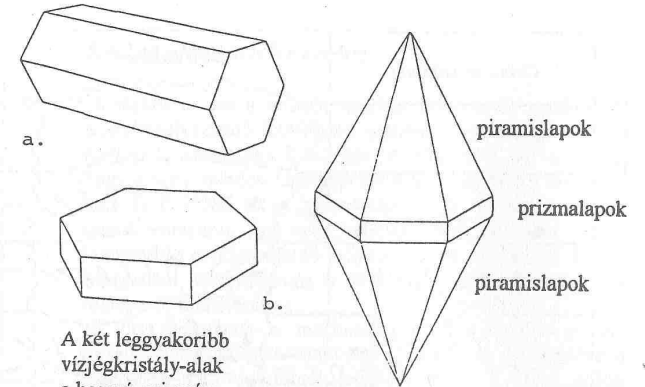
helyezkednek el. A gyűrű alakú tartomány egy kúp palástjára illeszkedik. A kúp tengelye a Napot a megfigyelővel összekötő egyenes, a kúp nyílásszöge az előbb említett 42 fok kétszerese.

A Nap sugarait különböző hullámhosszú fénysugarak alkotják. A különböző hullámhosszú fénysugaraknak kicsit más és más a törésmutatója a vízre, ezért a vízcseppek optikai prizmaként is viselkednek, s a Nap összetett fényét a színkép tartományaira bontják, amelyek egymás mellett találhatóak a szivárványban is.

5.6.2 Hold körüli haló szembeszórás jégkristályokon

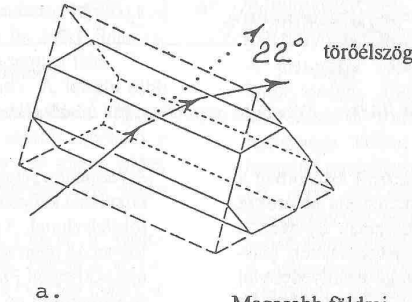
A Hold körül ritkán ugyan, de megfigyelhető egy vékony fénylő gyűrű. A gyűrű nyílásszöge leggyakrabban kétszer 22 fokos. Ezt a gyűrűt a légkörben tartozkodó jégkristályok hozzák létre. Ismét egyetlen jégkristályon való ideális fénytut figyelünk meg először, majd a megfigyelő számára éppen a gyűrű megfigyeléséhez alkalmas helyzetű térbeli helyzetet vázoljuk föl.

A jégkristályok gyakran hatszöges prizmak alakjában kristályosodnak. Tekintsük a légkörben lebegő jégkristály ideális alakját. A hatszöges prizmak sokféle végső alakúra fejlődhetnek, s ez a végső alak a jégkristályok keletkezésének és növekedésének fizikai körülményeitől függ. A 22 fokos halót a hosszukás jégkristályon, mint prizmán áthaladó, megtörő és eltérülő fénysugarak hozzák létre.

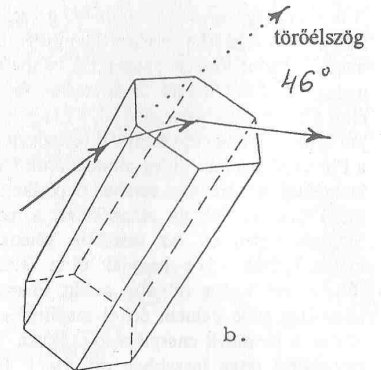


A két leggyakoribb vízjégkristály-alak a hosszú-prizmás és a lapos-táblás hatszöges alak

A piramislapokkal záródó vízjégkristályoknak még kisebb törőélszöge is lehet, mint a prizmalapokkal és két véglappal borított kristályoknak.



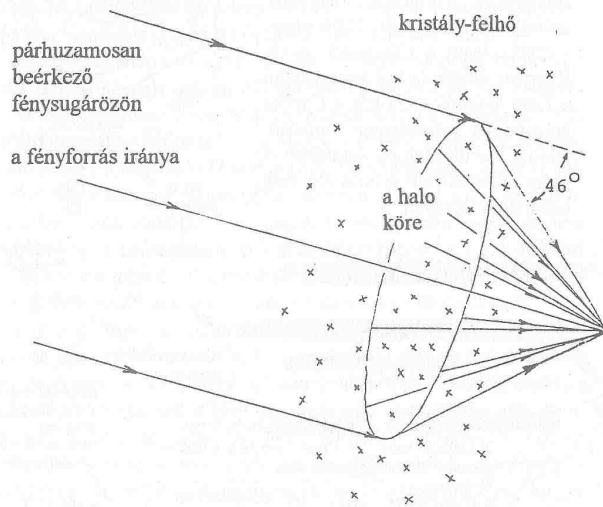
Magasabb földrajzi szélességeken a halók a Nap körül is megfigyelhetők.



A prizmán történő áthaladásakor a beeső fénysugár haladási iránya megváltozik. Ezt a változást az eredeti iránytól való eltérülés szögével jellemzik. A 60 fokos törőélen 22 fokos, a 90 fokos törőélen 46 fokos eltérülés keletkezik. Ez a legkisebb eltérülés a prizmán való fény áthaladásakor, mert ferde beesésnél ennél kissé nagyobb eltérülés jön létre. Ezért nem éles gyűrű a haló, hanem diffúz, elmosódó szélű.

Tekintsük a hatszöges prizma hossz tengelyére merőlegesen haladó és a prizma 60 fokos (kiegészített) törő élén megtörő fénysugár útját. Ennek eltérülési szöge 22 fok. (A kissé ferdébben belépő fénysugarak kissé nagyobb szöggel térülnek el.) Ha a jégkristály ilyen hatszöges nyúlt prizma, akkor a geometriai test alakjából következik, hogy sokkal több sugart térít el a most leírt irányban, mint a derékszögű véglap-éleken.

Ha a jégkristály lapos, táblás, hatszögű lemez alakú, akkor viszont a 90 fokos véglapi törőszöge hoz létre számottevően több fénysugár eltérítést. A 90 fokos törőszögű jégkristályon 46 fokos az eltérülési szög. Ilyen alakú jégkristályok ritkán vannak a légkörben, s a hozzájuk tartozó haló gyűrű kétszer 46 fokos nyílásszögű.



az eltérülés szöge derékszöggel törő élű prizmákon

megfigyelő

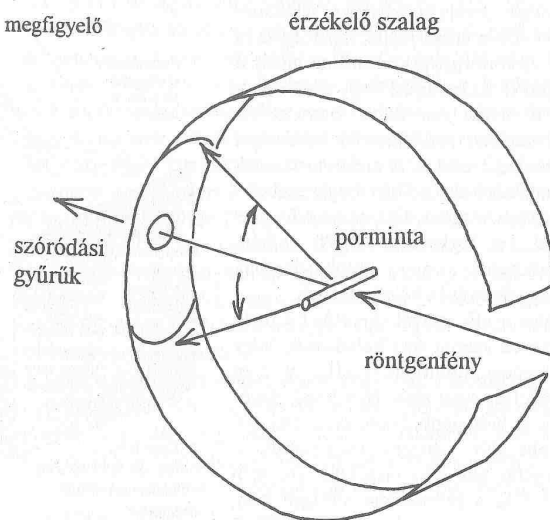
A térben lebegő jégkristályok helyzete pillanatról pillanatra változik. A vázolt törési és eltérítési jelenség folyamatosan megtörténik. A megfigyelő azonban egy folyamatosan megfigyelhető fénylő gyűrűt lát a Hold felé tekintve.

Az egyik lényeges különbség a holdi haló és a szivárvány között az, hogy míg a szivárványnál visszaszórás történik, a holdi haló szembeszórással jön létre. A Hold felé tekintő megfigyelő számára az a kristály szemcse hozhat létre gyűrűt, amelyik egy meghatározott térbeli helyen a megfigyelő irányába hajlítja el a Holdról érkező fénysugarat. A halót

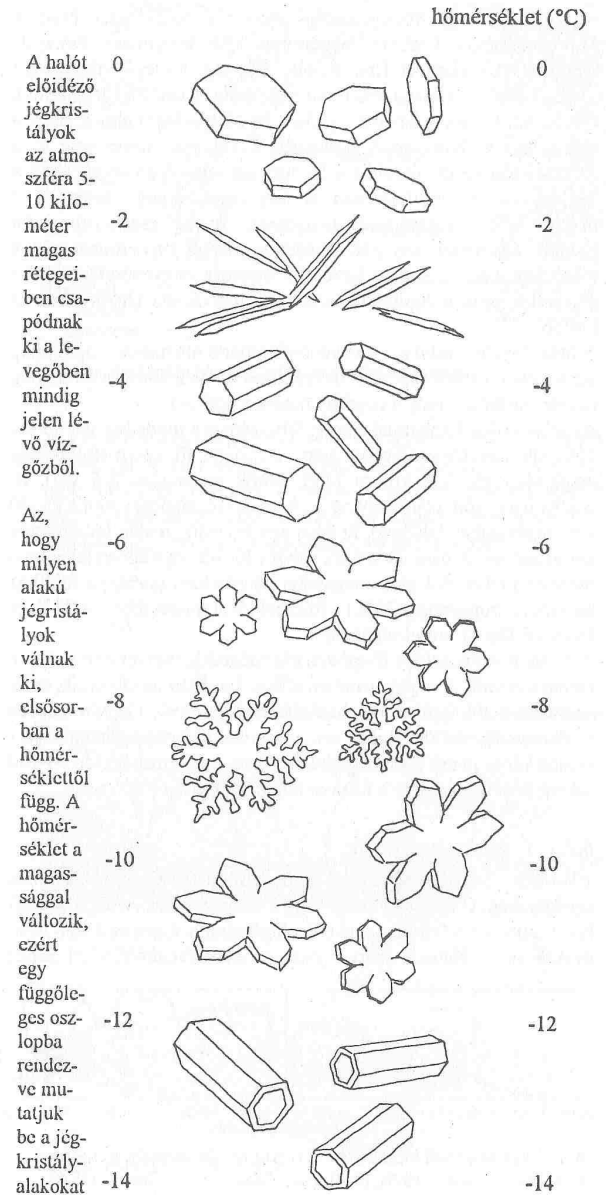
létrehozó jégkristályok sokasága pillanatról pillanatra változóan más és más, ezek azonban elegendően nagy számban vannak jelen ahhoz, hogy egy folytonosan megfigyelhető összképet rajzoljanak ki.

5.6.3. Debye-Scherer szórás röntgenfényvel, ásványokon

A kristályos szemcsékből álló sokaság szóródási jelenségeit más tudományterületeken is fölhasználják. A porrá őrölt kristályok szemcséi igen kicsik. A röntgenfény hullámhossza atomi mérettartományba esik. A röntgensugárzás a porított ásványok rácsikkjain szóródva hoz létre interferenciát. A jól ismert Pauli-féle szórási képlet szerinti erősítés az éppen előnyös irányban elhelyezkedő szemcséken jön létre. Itt a mérés során a röntgenforrásnak és a porminta-tartónak a szögét változtatják folyamatosan, ezáltal minden beesési szög létrejön. A pormintáról visszaverődő röntgensugár erősítési gyűrűket hoz létre egy érzékelő felületen.



5.6.4. A jégkristályok alakja a hőmérséklettel változik



Az, hogy milyen alakú jégkristályok válnak ki, elsősorban a hőmérséklettől függ. A hőmérséklet a magassággal változik, ezért egy függőleges oszlopba rendezve mutatjuk be a jégkristályalakokat

6. A FÖLDINÉL SŰRŰBB LÉGKÖRÖK

6.1. A Titán

A Titán az egyetlen jelentős légkörrrel rendelkező hold a Naprendszerben. Légköre megtartását több körülmény összejátszásának köszönheti. A Titán pl. már elég nagy tömegű ahhoz, hogy a nagy szökési sebesség miatt már meg tudja tartani légkörét (ettől a Galilei-holdaknak is lehetne légköre), de elég hideg is ahhoz, hogy a légkör kisebb hőmozgású molekulái közül csak kevés érje el a szökési sebességet. Továbbá a Szaturnusz sem olyan óriási, mint a Jupiter, amely gravitációsan is (semleges anyag esetén) és a magnetoszféra segítségével is (ionizált anyag esetén) elragadja holdjai légkörének anyagát. A Szaturnusznak nem olyan erős a mágneses tere, és sokkal kevesebb benne a nagyenergiájú töltött részecske, mint a Jupiternél, ezért az ezek okozta légkörerózió is kisebb.

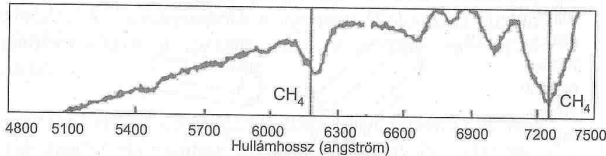
A titáni légkör – mint azt a Voyagerek ottjárta óta tudjuk – optikailag átlátszatlan. Ennek oka az a természetes eredetű fotokémiai szmog (metán füstköd), mely a napfény hatására alakul ki.

Az átlátszatlan fotokémiai szmog felső rétege a modellek szerint kb. 200-300 km magasságban van. A titáni fő (etán-)felhőréteg magassága kb. 125 km (a földi felhők magassága 2-6 km). Itt található egy sűrű etánködérteg is. A metán kicsapódási pontja kb. 40 km magasságban található, itt tehát egy második, metánfelhőreteg számíthatunk. A narancs színű néhány kis mennyiségben jelen levő összetevő tehet. A légkör magassági hőmérsékleti görbéje a földihez hasonló: a tropopauza (70 K) a földinél jóval magasabban, a 94 K-es felszín fölött 42 km-el található.

A Titánon valószínűleg üvegátháztatás működik, melyet elsősorban a metán tart fenn. A metán azonban idővel fokozatosan elbomlik, és ha nem termelődik újjá, az üvegátháztatás is megszűnik, a légkör lehül és elvékonyodik. Az ősi légkör sok ammóniát is tartalmazhatott, mely valaha képes lehetett olyan üvegátháztatásra, ami annak idején 10-100 fokkal is megemelhette a felszíni hőmérsékletet.

6.1.1 A légkör összetétele

1944-ben fedezte fel Kuiper a metán elnyelési sávját a Titán színképében. Ő azonban ekkor még a Titán narancs színét a Marséhoz hasonlóan a felszín színének tulajdonította. Csak az 1960-70-es évekre vált világossá, hogy a narancs szín a légköré. Carl Sagan



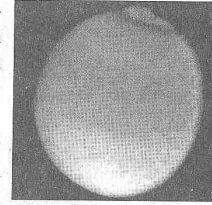
A Titánról készített hiperspektrális görbén jól láthatók a metán elnyelési vonalai (1978, McDonald Observatorry, Texas, USA)

1971-ben vetette fel először, hogy a felhőréteget bonyolult szerves (szénalapú) molekulák alkotják. Ezután számos laborkísérletben igyekeztek reprodukálni a Titán légkörét. A végredményül kapott narancs-barna polimerket a görög zavaros, sáros szó után tholinnak nevezik.

Sokak számára nagy meglepetés volt, amikor a Voyager űrszondák ottjártakor bebizonyosodott, hogy a légkör fő összetevője a nitrogén (85-90%). A második legfontosabb alkotóelem a metán (3-6%). A Voyager adatai alapján H₂ (0,1-0,4%) és további szerves vegyületek (szénhidrogének) – C₂H₆ (etán), C₃H₈ (propán), acetilén (C₂H₂), stb. – jelenlétét is felfedezték, melyek a Napból érkező ultraibolya sugárzás és a Szaturnusz mágneses teréből származó elektronok hatására keletkeztek. A metán a Nap ultraibolya sugárzása hatására a mezoszférában CH₂ és H₂-re bomlik. A CH₂ ezután más szénhidrogénekké kombinálódik, miközben a H₂ elszökik a légkörből. A folyamat megfordíthatatlan, így a metán ma megfigyelhető mennyisége a Voyagerek mérése alapján alig 28 millió év alatt el kellene tűnjön. A végtermék az etán, mely ellenáll az UV sugárzásnak, és a légkörből hamar kicsapódik a tropopauzában. Ezután a felszínen folyadékként – metánnal és nitrogénnel együtt oldatként – felhalmozódik. Lehetséges tehát a Titánon tengerek jelenléte is, melyek fenntartják a metánkörforgást (eső, folyadékerozió a felszínen, tengerek, párolgás). A földi mérések alapján ma úgy látjuk [2002], hogy a Titánon ha van is óceán, az nem az egészt felszínt borítja.

Nem tudjuk, honnan és milyen gyakran kap utánpótlást a légköri metán. Az egyik lehetséges forrás a felszínen felhalmozódott etán-metántengerek kipárolgása (a földi vízkörforgáshoz hasonlóan táplálná a légkört). Lehetséges, hogy a vízjégrétegben metán van fogva tartva a víz szerkezetében (metánklatrát). Lehetséges vulkanikus eredet is. A metán forrásának megtalálása kulcs a Titán megértésében. Időközben vízgőzt, CO₂-ot és CO-ot is találtak a légkörben. Ezek vulkáni kigőzölgések vagy üstökösdarabok becsapódása révén keletkeztek.

A légkör fő részét alkotó nitrogén feltevések szerint úgy keletkezett, hogy az eredeti ammóniát (NH₃) a Nap ultraibolya sugárzása (fotolízis) nitrogénre és hidrogénre bontotta le, melyből a nehezebb nitrogén megmaradt, a könnyebb hidrogén elszökött. De nem zárható ki a primodiális nitrogén sem,

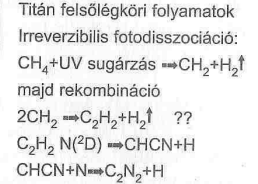


Évszakos változások: a légkörnek hol északi, hol déli része sötétebb, sűrűbb. (Voyager-kép)

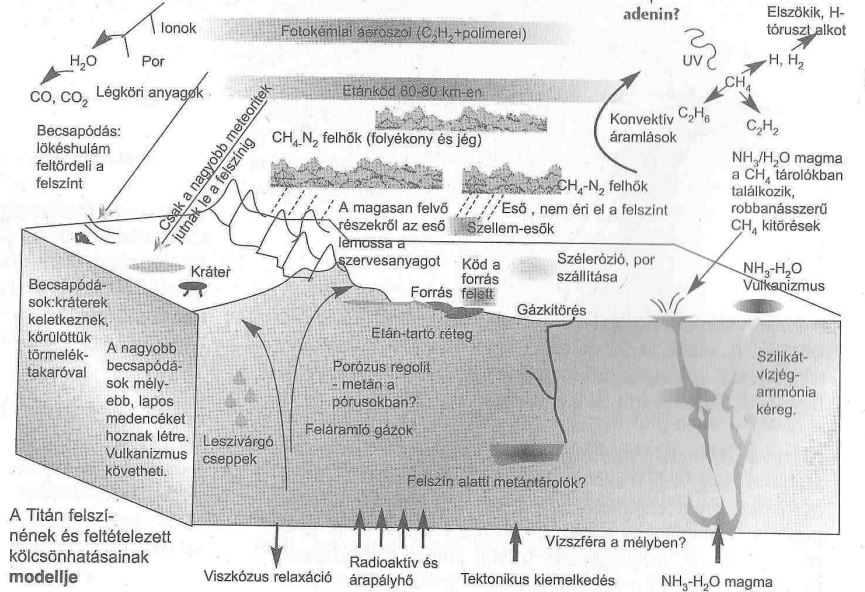
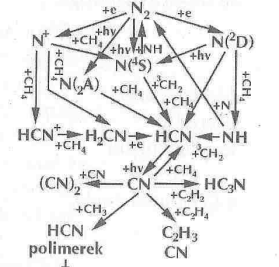
mely a Szaturnusz kialakulása ideji ősfelhőből származhat. Lehetséges évszakos vagy állandó szelek jelenléte is. A Titán felsőlégkörében és sebességű (100 m/s) futóáramlások találhatók (a felsőlégkör 26 óra alatt tesz meg egy fordulatot). A troposzférában azonban alacsony a hőmérséklet-különbség (pár fok) így itt szélcsendre (max. 1m/sec) számíthatunk.

A Titán légkörének összetétele hasonlít a Föld feltételezett élet előtti légköréhez. A földi

CO₂ helyett azonban itt CH₄ tárolja a szénét és okoz üvegátháztatást. Ezeket folyamatosan bontják-alakítják a Szaturnusz magnetoszférájának részecskéi. 2004 végén - 2005 elején a Cassiniról leváló Huygens űrszonda fog leereszkedni a Titán légkörébe. Ezután a Cassini űrszonda a felhőrétegen keresztülható radarhullámok segítségével fogja feltérképezni a hold ma még ismeretlen felszínét.



Az aminosav-szintézis lehetséges menete:



6.2. A Vénusz

A Vénusz vastag, sűrű, nagy tömegű, a látható fényben sárgászöld színű tejszerű felhőtakaróba burkolódzó bolygó. Ha a Vénusznak a földihez hasonló felszíni és légköri viszonyai lennének, egy számítás szerint – mivel közelebb van a Naphoz – +38 °C lenne felszínén. Mégsem ilyen körülményekkel találkozunk itt: a Vénuszt „pokoli világként” is emlegetik a hatalmas forróság, vulkánjai és kénsavas esői miatt. Légköre 96,4%-ban CO₂-ből áll, felszínén az elszabadult üvegházhatás miatt 500°C a hőmérséklet. A felhőtakaró átlátszatlan, a felszínt csak radarhullámokkal lehet feltérképezni.

A Vénusz élete korai szakaszában biztosan nem a mai „száraz poklot” találtuk volna, hanem könnyen lehet, hogy kellemesen meleg éghajlatot, és sok vizet is. A kezdeti vulkáni aktivitás valószínűleg a földihez hasonló összetételben és mennyiségben bocsátott ki gázokat, így vízgőzt is, mely tengerekben gyűlhetett össze. (A Marson a víz részben elszökött, részben a talajba fagyott). A víz a Vénuszon – még a kőzetekből is – teljesen eltűnt.

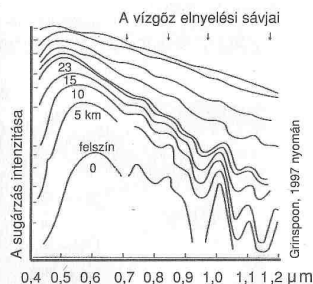
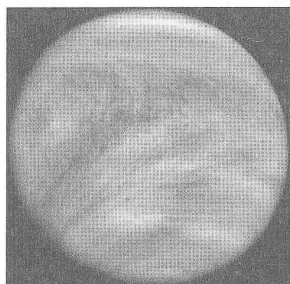
A víz régebbi jelenlétét a vénuszi légkör magas hidrogén:deutérium (H:D) aránya bizonyítja. A Földön 6000 H atomra jut egy D atom, a Vénuszon minden 50-re. Mitől van ilyen sok D a Vénuszon? A D nagyobb tömegű, mint a H, így ahogy a H ürbe szökik kis tömege miatt, a bolygón maradó D feldúsul. A Vénuszon nagyon sok H-nak kellett már elszökönie: valószínűleg ez a sok H a régi víz alkotórésze volt. Igaz: nem ismerjük az anyagok kiinduló mennyiségét és nem tudjuk, hogy a hidrogén mennyi utánpótlást kapott. A 0,5-1 milliárd évvel ezelőtti globális felszínűjraképződés (vulkanizmus és az ezzel járó gázok felszabadulása) is sok mindent megváltoztathatott.

A nagyobb napközelség miatt a Vénusz a földinél valamivel magasabb hőmérsékletű volt. A Vénusz óceánja forró lehetett, erősen párologhatott. A Vénuszon (is) beindult az üvegházhatás, azaz az infravörös kisugárzást a sűrű vízgőz – erős elnyelése miatt – nem engedte kijutni az űrbe. A forró légkörbe kicsapódott víz az elméletek szerint sosem jutott vissza az óceánba, mert még a légkörben elpárolgott. A tropopauza egyre magasabbra került. A folyamatosan alulról pótlló vízpára hidrogénje a magaslégkörben a Nap UV sugarainak hatására fotodisszociációval az űrbe szökött. Az erősödő vulkáni aktivitás miatt nőtt a CO₂ kibocsátás is, ezzel pedig az üvegházhatás. Miután az óceánok teljesen elpárolgottak, a hőmérséklet a víz forráspontja fölé emelkedett – mely a nagy

Az üvegházhatás mértéke

	T*	T _{mért. átl.}	Vált.
Vénusz	230	740	500
Föld	255	288	33
Mars	210	218	7
Titán	84?	94	10?
Plútó	(100)	40	?

*A jelenlegi albedó mellett, de a légkör melegítő hatása nélkül ennyi lenne az átlagos felszíni hőmérséklet.



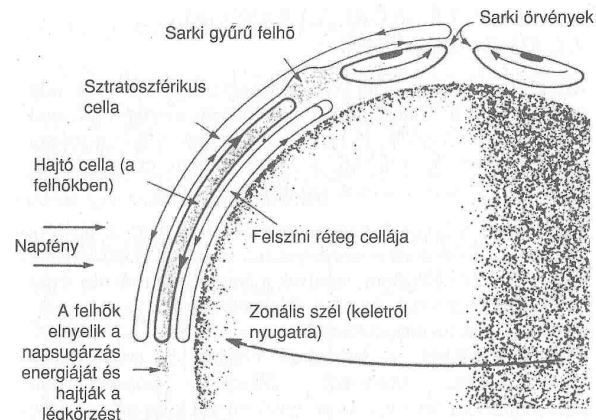
A Vénusz ultraibolya fényben (balra, Pioneer Venus Orbiter 1979). Jól látszik, hogy csak egy cellás a légköre. A kép közepe (a szubszoláris pont) a legforróbb (helyi dél az egyenlítőn): itt a legerősebb a levegő felmelegedése, és ezzel a felemelkedése. Jobbra a Venyera-11 mérése leszállás közben a napsugárzás egyre csökkenő intenzitásáról. Az ibolya elnyelés miatt a napfény színe lefelé menet egyre a vörös felé tolódik el.

légnyomás miatt akár (max.) 375 °C is lehetett. A vízgőz eltűnésével a légköri CO₂ egyre inkább a vénuszi atmoszféra uralkodó összetevője lett.

Jelenleg az egyik legfontosabb elem az anyagok vénuszi körforgásában a kén. A felhők felett található a *fotokémiai zóna*, ahol a folyamatokat a Nap ultraibolya sugárzása hajtja. A légkör 0,015%-át alkotó SO₂ a 0,002%-nyi víz kénsavvá alakul. A kénsav a neki megfelelő hőmérsékleten kicsapódik, apró cseppjei felhőket alkotnak. A felhőkből a cseppek esőként kihullanak, de a felszínt sosem érik el: kb. 30 km-nyi út után – még a magasban – elpárolognak. A növekvő hőségben a kénsav szétbomlik vízgőzre és kén-dioxidra. Ebben a zónában a felhalmozódó *hő energiája* hajtja a kémiai folyamatokat. A felszínen a *kőzetekkel való reakciók* uralkodnak. Ez az ásványi pufferzóna: az ásványok raktározzák a légkör gázait. A vulkáni aktivitás (valószínűleg ma is) sok SO₂-t juttat a légkörbe.

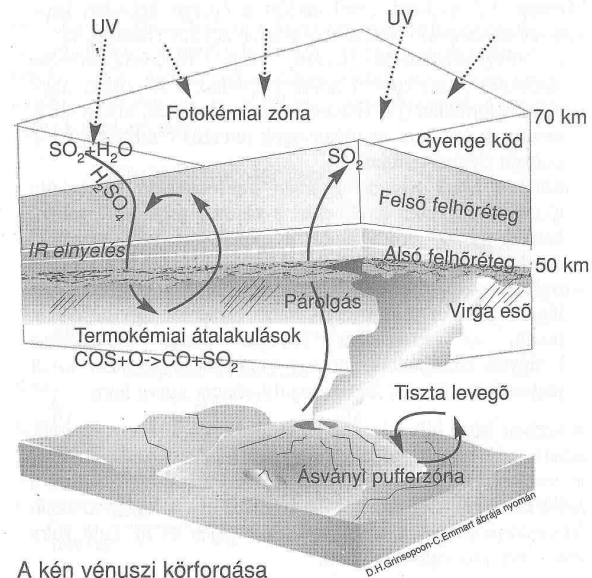
A sűrű, már-már vízhez hasonló tulajdonságú légkör áramlásai nagy hatékonysággal osztják el a Naptól érkező hőt. Éjjel-nappal, a sarkokon és az egyenlítőn nagyjából hasonló a hőmérséklet (a Vénusz tengelydőlése 2°, így évszakok sincsenek). A bolygó lassú forgása miatt a legegyszerűbb légköri cirkuláció alakult ki: egy cirkulációs cella, melyben az egyenlítőn a meleg levegő felszál, a sarkokon leereszkedik, majd a felszínhez közelebb visszatér az egyenlítőhöz. A különböző irányban fújó légköri zónák hiányában ciklonok sem alakulnak ki.

A felső légkörben ún. szuperrotáció alakult ki: a felhőréteg tetején a nyugat felé fújó 100 m/s sebességű szelek 4 nap alatt körbefutnak az alattuk 243 földi nap alatt a földivel ellentétes irányban egy fordulatot megtevő a felszín felett. A fordított forgás és a 224 napos keringési idő miatt egy vénuszi nap kb. 116 földi napig tart, azaz egy nappal 58 földi napig tart).



A vénuszi légkörzés modellje Alvin Seiff nyomán

A Vénuszon kétféle globális áramlás figyelhető meg. Az egyik a felsőlégkörben a nappali (meleg) oldal irányából az éjszakai (alig hűvösebb) felé tart. A másik a keletről nyugat felé fújó szél. A sarkok közelében még egy állandó örvényzónát is feltételeznek, mely a két mozgásból együttesen ered.



A kén vénuszi körforgása

D.H. Gillespie, C. Emmert ábrája nyomán

7. A MARS LÉGKÖRI JELENSÉGEI

7.1. Kihűlt, száraz üvegház

Kialakulása során a Mars körül hidrogénből és héliumból álló gázanyag lehetett, amelynek könnyű összetevői rövid idő alatt ellillantak a bolygóközi térbe, a kis tömegeből adódó alacsony szökési sebesség, valamint a fiatal Naptól érkező töltött részecske-áramlás, a napszél eróziós hatása miatt.

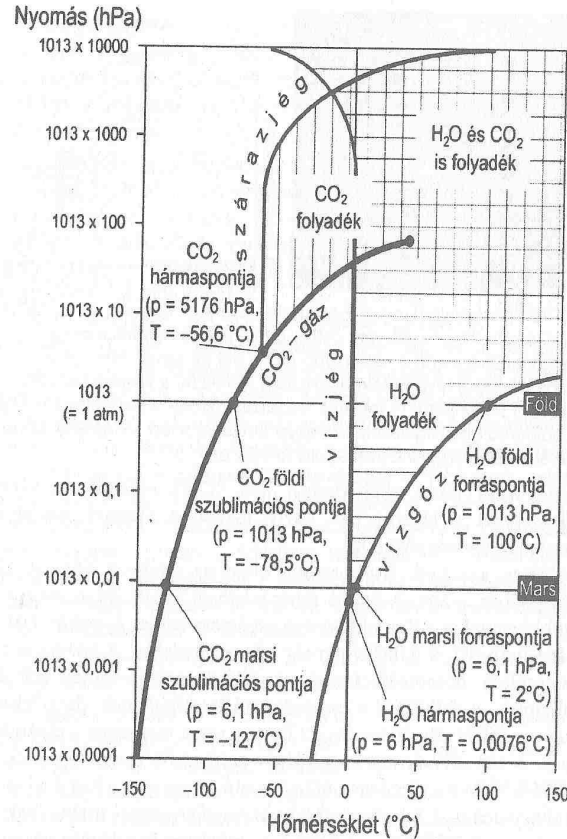
Ám a fiatal bolygónak néhány százmillió év alatt új légköre született, két folyamat eredményeként. Egyrészt külső hatásra, azon égitestek anyagából, amelyek a Naprendszer távoli, jeges vidékeiről származtak s a Mars felszínébe csapódva illóanyag-tartalmuk gáz halmazállapotúvá vált az ütközési hő hatására. Másrészt belülről, a radioaktív bomlás és árapály-fűtés eredményeként újraolvadó szilikátos kőzetanyagból gázosodott ki intenzív vulkáni tevékenység kíséretében. Ez a másodlagos légkör főként CO₂-ből, vízgőzből és ammóniából állt, tehát erősen redukáló jellegű volt (hasonlóan a Föld akkori légköréhez), amely erőteljes üvegházhatást okozott.

Ekkor, a Noachi időszakban 0 °C felett volt a hőmérséklet, s egyes modellszámítások szerint a légnyomás megközelítette az 1000 hPa-os jelenlegi földi értéket. Ezt másként „nedves Mars” időszaknak is nevezik, mert a H₂O tartóan folyékony állapotban volt, a felszínen pedig aktív vízkörforgás zajlott, jellegzetes formakincset alakítva ki.

Mintegy 3,5 milliárd évvel ezelőtt a bolygó éghajlati képe alapvetően megváltozott, több folyamat együttes hatásaként:

- a bolygókeletkezést lezáró Nagy Meteoritbombázás részeként óriási méretű testek csapódtak a felszínbe, nagy méretű formákat (pl. Hellas-, Argyre-medence) hozva létre, amelyek hatására az illóanyagok jelentős része elhagyta a bolygót (légkör-elfújás);
- mivel a Mars nagyon gyorsan hűlt, fiatalon elvesztette globális mágneses terét, ezért a napszél részecskéi sokkal hatékonyabban erodálhatták a „ kozmikus védőpajzsától” megfosztott bolygó légkört;
- továbbá az égitest belső hőtartalékai fogytak, a vékonyodó légkör által okozott üvegházhatás csökkent, így a felszín lehűlt, az atmoszféra anyagai pedig fokozatosan kifagytak/kicsapódtak, poláris sapkákat és felszín alatti jégtesteket valamint fagyos regolit-réteget hozva létre.

A nedves Mars időszak után tehát jeges periódus következett, amely valószínűsíthető ingadozásoktól eltekintve napjainkban is tart. A víz szerepének háttérbe szorulása utat nyitott a szélerezio számára, amely több milliárd éve a legintenzívebb felszínformáló erő a rendkívül lassú jeges és az igen ritka lejtős tömegmozgások mellett.



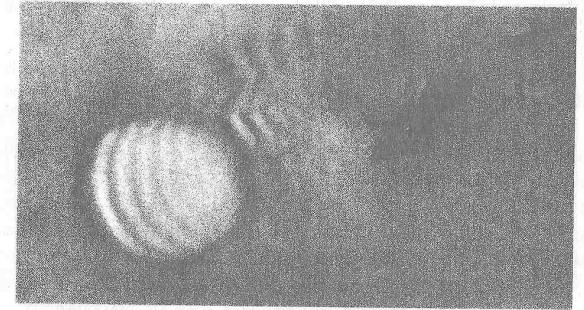
A 95 %-ban CO₂-ből álló légkör vékony és ritka atmoszféra igen érzékenyen reagál a légkör és a felszín közötti évszakos CO₂-körforgásra: télen a légkör 20-30 %-a kifagy a felszínre szárazjég-lepel formájában. Az éghajlat alakulása szempontjából ezért a CO₂ téli „felszíni raktározói”, az időszakos poláris sapkák a legfontosabb területek.

Az alacsony nyomás miatt a folyékony H₂O csak rendkívül szűk hőmérsékleti tartományban stabil a felszínen. Sárfolyások belsejében, illetve hajnali dérboritásként fordulhat elő, mivel már +2 °C-on felforr s vízgőzzé válik. Így ha hullik csapadék a Marson, annak anyaga inkább CO₂-hó. A légkör időnként azonban olyan hideg, hogy még rendkívül kis mennyiségű páratartalmától is telítetté válhat, s vízjég-felhők alakulhatnak ki benne.

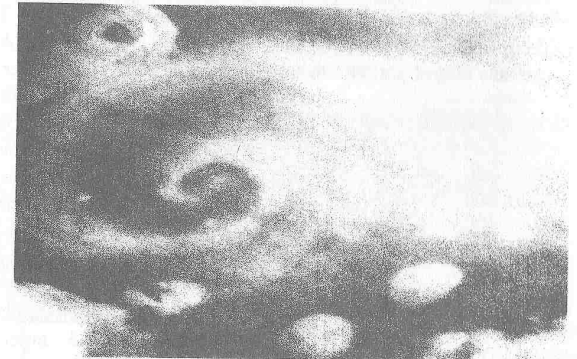
7.2. Furcsa felhőformák

A felhők gyakoribbak a hideg évszak során, a téli féltekén, de az Egyenlítő térségében, az északi poláris régió felett és domborzati magaslatok körül az év bármely időszakában előfordulnak csoportok. A légköri összetétel ismeretében anyaguk H₂O és CO₂ egyaránt lehet, a műszeres vizsgálatok szerint többségük vízből áll.

Becsült magasságuk 10-15 km közötti, apró vízjég-kristályaik kékes-fehéres színűek. Formájuk leginkább a földi fátyol- vagy lepelfelhőkhöz hasonló. Különleges típus a hullámfönt-felhő, amely domborzati akadályok mögött alakul ki: a magaslat miatt felszálló légtömeg lehül, páratartalmából felhő képződik, majd túljutva az akadályon leereszkedik, s a felhő eloszlik. Ez egymás után, sok hullámban zajlik, párhuzamos felhősávokat alakítva ki.



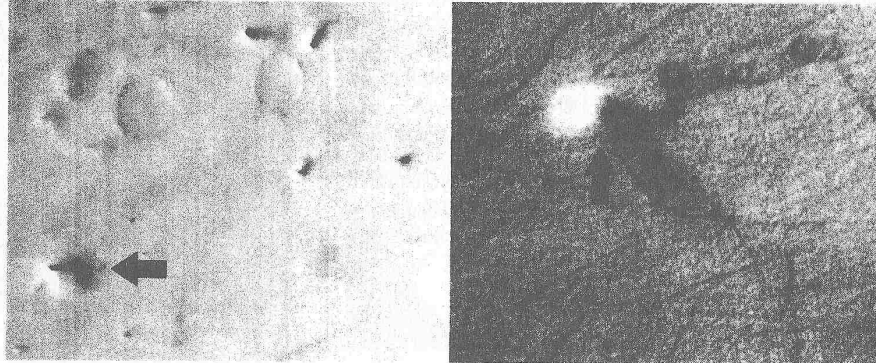
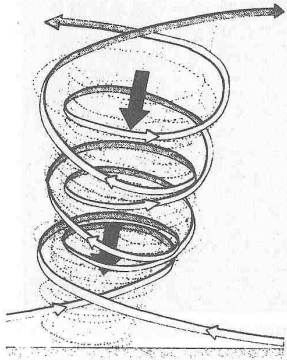
A pólusok körül frontokra jellemző felhőmintázat is előfordul, ciklonszerű légköri képződményekhez kapcsolódóan. Egyes alacsonyan fekvő területeken, például völgyek, kanyonok vagy kráterek aljzatán pedig felszínközeli köd is megfigyelhető, a hajnali órákban és szürkület idején.



7.3. Por: tölcserék és viharok

A légkör furcsa jelenségei a portölcserék (dust devil), amelyek tulajdonképpen a felszínen haladó, több kilométer magas légörvények (hasonlók a földi portölcserékhez, csak nagyobbak azoknál). Képződésük oka a felszíni törmelékanyag kis hőkapacitása, amely a felszínközeli levegőréteg rendkívül gyors melegedését és felemelkedését okozza. A portölcser az összeáramlás miatt forgásba kezdő légtömegekből alakul ki, általában kevéssel a helyi dél időpontja után. Külső falát spirálisan felfelé emelkedő légoszlop jelenti, belsejében pedig leszálló légmozgás jellemző.

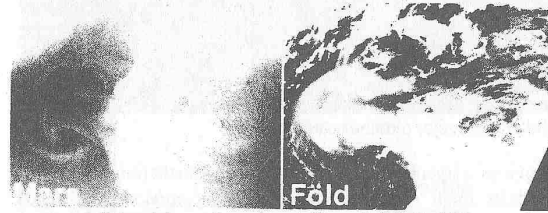
A portölcserék felszíni nyomai igen látványosak: számos felvételen ismerhető fel spirális alakú sötét nyomvonaluk, amelynek mentén haladva felkavarták a felszín poranyagát, illetve néhány helyen az éppen „működő” örvény is látható.



A portölcserék mindezeknél sokkal fontosabb sajátossága, hogy amerre járnak, a légkörbe emelik a felszínt borító, világos árnyalatú, sárgászörös színű poranyagot. A szemcsék jellemző mérete néhány ezred mm. Gyakori meteorológiai jelenségek, ezért állandó légköri portartalmat alakítanak ki a 30-40 km magas troposzféra teljes vastagságában. Mivel a csapadékképződés szinte kizárt, a por rendkívül lassan ülepedik ki a légkörből. A portartalom optikai következménye a marsi nappal vöröses „lazacszín” árnyalata, amely csak a felkelő és lenyugvó napkorong közelében látszik kékes színűnek. A légköri poranyagot történő szóródás okozza azt a légköri derengést is, amely napkelte előtt valamint napnyugtá után is órákon át látható az égen.

A felszínt borító törmelék a portölcseréktől függetlenül is a légkörbe juthat, ugyanis még nagyobb mennyiséget emelnek magasba a porviharok. Instabil légköri viszonyok hatására alakulnak ki, leggyakrabban a déli félgömb tavaszán, amikor a

Mars napközében van s ezért az időszakos CO₂-jégborítás hirtelen szublimál a légkörbe, szinte egy a pólus felől távolodó „nyomásfalat” hozva létre.



Marsi és száharai porvihar úrfelvételen

A felerősödött szelek egyre több port kevernek fel, sárgás színű porfelhőt alakítva ki, miközben a vihar felszíni mérete egyre növekszik, s regionális vagy akár globális porviharrá

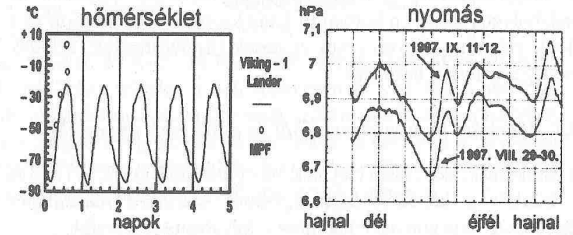
válhat. Ilyenkor a felszín jól ismert alakzatai, sötétebb és világosabb foltjai több hónapon át nem láthatók, mintha elhomályosulna a bolygó korongja.

A porviharok során beindul a porfütési folyamat, amely azt jelenti, hogy a légköri portartalom leárnékolja a bolygófelszínt, így a napsugarak nem azt, hanem a porban gazdag légköri réteget fűtik fel a legjobban. Az atmoszféra ezért nem alulról melegszik fel, s lehetséges, hogy nem az Egyenlítő térsége a legmagasabb hőmérsékletű terület. Ezzel együtt a bolygó Nap felőli oldalán állandóan jellemző légköri dudor alakja eltorzul, mivel a Nap alatti régió felszínközeli légtömegei nem tágulnak ki, a porvihar területén viszont másodlagos kidudorodás jöhet létre.

A porviharok területén több tíz Celsius fokkal is megnőhet a hőmérséklet, így sajátos kapcsolat áll fenn a melegebb marsi időszakok és a globális porviharok között.

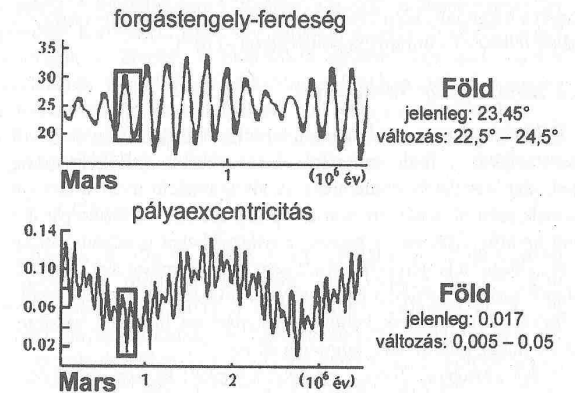
7.4. Nyugodt időjárás, változó éghajlat

A marsi légkör folyamatai minden jel szerint kevésbé változatosak és dinamikusak, mint saját bolygónk jelenségei, amelynek legfőbb oka a kis mennyiségű víztartalom. A leszállóegységek mérései jól mutatják, hogy a fizikai paraméterek, például a hőmérséklet és a légnyomás napi ciklusa igen szabályosan ismétlődik.



A nyomásváltozás különlegessége, hogy egy marsi nap során 10-15 %-os is lehet, amely nagyságrendekkel nagyobb a Földre jellemző értékénél. Am a nyomásgörbék lefutása a különböző évszakok során is hasonló alakú marad. Az évszakos eltolódást az állandó pólussapkák köré a légkörből télen kifagyott időszakos CO₂-jégborítás tavaszi visszaolvadása okozza, amely számottevő mértékben növeli a légnyomást.

A globális éghajlat viszont a Mars esetében változékonyabb, a ritkább légkör, a mérséklő hatású, kiterjedt óceán hiánya, a forgástengely térbeli ingadozását stabilizálni képes, nagy méretű hold hiánya, és a földinél excentrikusabb keringési pálya következtében.



8. RITKA LÉGKÖRŰ ÉGITESTEK

A ritka légkörű égitestek közé azok az objektumok tartoznak, melyeknél az exoszféra leér a felszínig, azaz a légköri atomok vagy molekulák szabad úthossza már itt olyan nagy, hogy kellő sebesség esetén el tudnak szökni a bolygótesttől. Ezek instabil légkörök, tömegük, kiterjedésük és összetételük térben és időben is nagymértékben változik. Ebbe a csoportba tartoznak az óriásbolygók nagyobb holdjai (a Titán kivételével), a Merkúr és a Hold, valamint a távoli jeges égitestek (üstökösök, a Plútó, esetleg a Charon) tartoznak.

8.1. Merkúr: légkör napszélből és a kőzetek anyagából

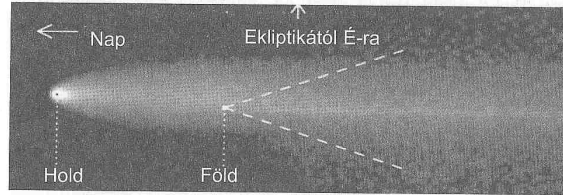
A Merkúrnak, akárcsak a Holdnak, nincs állandó légköre. A Hold és a Merkúr a kőzeteik kigázolásából származó másodlagos légköröket – kis gravitációjuk miatt – folyamatosan veszítik.

A Mariner-10 azonban megfigyelte az O, H, He jelenlétét, a földi mérések pedig Na, K, Ca -ot mutattak ki. A merkúri légkör sűrűsége és összetétele is igen változó. A teljes légkör tömege pár nap alatt 2-3 nagyságrenddel is megváltozhat. A Na és K mennyisége együtt változik, jellemzően a Nap felé néző (szubszoláris) ponton fordulnak elő. Eredetük az erős napsugárzás hatására felmelegedő kőzetek kigázolása (főleg a Caloris-medence „forró pólusának” környékén, ahol az egymáshoz kötött forgás és keringés miatt a Nap hosszabb ideig egy hely felett marad) ill. a napszél becsapódó részecskéi hatására kerülnek a légkörbe. A H, He a napszélből származik. Ezeket gyenge mágneses terével Merkúr folyamatosan befogja, majd az ionizált molekulák a felszínnel történő ütközéskor semlegesítődnek. Jelentős légkör híján nagy a napi hőingás (hiszen nincs, ami elszállítsa vagy elossa a hőt): a 88 napig tartó nappal idején a maximális hőmérséklet +430 °C, a 88 napos éjjel (vagyis a másik féltéken) a minimális hőmérséklet -170 °C.

8.2. Hold: légkör Na-csóvával

A Hold légköre ma rendkívül ritka, felszíni sűrűsége 10^{-20} g/cm³, ami összemérhető a földi exoszférával (és ritkább a Földön eddig előállított legritkább vákuumnál). A kis gravitáció miatt a könnyű elemek, mint pl. a hélium, már a napfény melegítő hatására pár óra alatt az űrbe szöknek. A napszél a nehezebbeket is néhány hónap alatt „elfújja” a Holdról (mivel azt nem védi mágneses tér). A gázok állandó szökése mellett a légkör anyaga folyamatosan utánpótlódik. A légköralkotó fő gázok: hélium, argon, nátrium, hidrogén, valamint kevés metán, szén-dioxid, ammónia és víz.

A légkör anyagának forrása egyrészt a napszél anyaga, másrészt a becsapódások hatására felszabaduló gázok. A koncentráció kb. 3000 atom/cm³ nappal (a világűrben az átlag 1 atom/cm³). Éjszaka



A Hold Na-csóvája, oldalnézetből (modell)

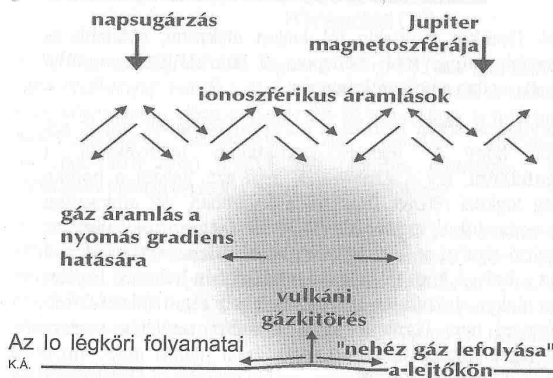
azonban más, s ilyenkor az összetétel is megváltozik (nappal a magas hőmérséklet miatt magas a kigázolás, ami módosítja a légkör összetételét). Az erős éjjeli lehűlés hatására a He relatív koncentrációja 20-szorosára nő (vagyis a többi összetevő csökken, köztük pl. az Ar egy része megkötődik a felszíni sziklákon vagy a talajban).

A légkör alakja leginkább egy üstökös csóvára hasonlít: a Nap felőli oldalon kétszeres, az ellentétes oldalon pedig nagyjából tízszeres holdtávmérről terjed ki. A kutatók 25 ezer km hosszú Na-csóvát figyeltek meg, melyet a napszél fúj el a Holdról. Jelentős légkör hiányában nagy a napi hőingás: a nappali oldalon +130 °C-ig emelkedik a hőmérséklet, míg éjszaka -160 °C-ig süllyed.

A Hold különleges jelensége a *hajnali szél*. Magyarázata, hogy a terminátor (a nappal-éjszaka elválasztó vonal) napsütötte oldalán felmelegedő felszínről gáz párolog ki, kiterjed, és az árnyékban levő oldal felé áramlik. A szél kialakításában közreműködik, hogy a terminátornál elektrosztatikus töltésű por kezd lebegni, és így a korábban a porszemcsék közt levő gáz is felszabadulhat.

8.3. A Jupiter Galilei-holdjainak légkörei

8.3.1. Io: pamacslégkör vulkánkitörésekből

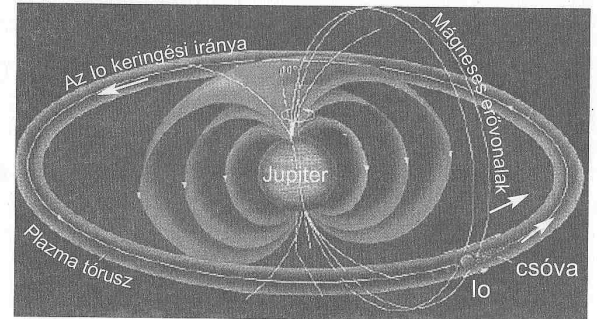


Az Io gejzírserű vulkánjai folyamatosan nagy tömegű illóanyagot bocsátanak az Io környezetébe. A kigázolás nem egyenletes, a vulkánkitörések helyén és idején erősebb, így ott átmenetileg sűrűbb

légkör alakul ki. A kitörések anyagát az Io nem képes megtartani. A gázok nagyobbik része azonban megszökik az űrbe. A kigázoló anyagok egy része lecsapódik a 100-110 K-es felszínre. Az Io körül maradt gázok - azaz a légkör - nagy része kén-dioxid.

Az Io körül másodpercenként 1000 kg anyag távozik. Ezt befogja a Jupiter „plazma tórusza”, vagyis kén- és nátriumgyűrűje. Az Iónak nincs mágneseszférája, mely légkört megvédené. Ezért a Jupiter mágneseszférájának részecskesugárzása folyamatosan bombázza az Io légkört: ionizálja és az Io Jupiter körüli pályája mentén fánk alakban szétteríti anyagát. Némi kénes tartalmú anyag jut a környező holdakra (pl. Amalthea, Europa) is.

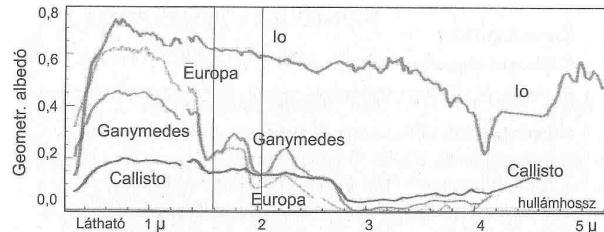
Az Io napsütötte oldala felett is kialakul ionoszféra, ami a Jupiterrel összeköttetésben van. Ebben néhány millió amperes áramok folynak. Az Io körül a Na, K, O, S semleges felhőket alkot. A Na-felhők a Földről is megfigyelhetők.



Az Io plazma tórusza. Az Io egy keringést 1,8 nap alatt tesz meg, míg a mágneses erővonalak a Jupiter tengelyforgását követve 10 óra alatt tesznek meg egy fordulatot. Ezért az Io „csóvája”, melyet a mágneseszféra magával sodor az Iórlól, előre mutat.

8.3.2. A Ganymedes

A Ganymedes magas szélességű területein sapka borítja a felszín, amely világos, fehér vagy rózsaszínes lepelként borítja a jeget, megváltoztatva a felszín albedóját. A képződmény vízgőz molekulákból áll, amelyek milliméteres, vagy még vékonyabb takaróként fedik a holdat. Átlagosan a 40-45 fokos szélességig húzódik le a pólusoktól. Kialakulásukra részecskebombázást feltételeznek, mert a Ganymedes saját mágneses tere csak a pólus környékére engedi be a Jupiter mágneseszférájában mozgó nagyenergiájú töltött részecskéket. Azonban esetleg a meridionális légköri szállítás is szóba jöhet. Alacsony szélességen a napsugárzás és esetleg a részecskebombázás hatására a felszíni jég elpárolog, és magasabb szélességen csapódik ki.



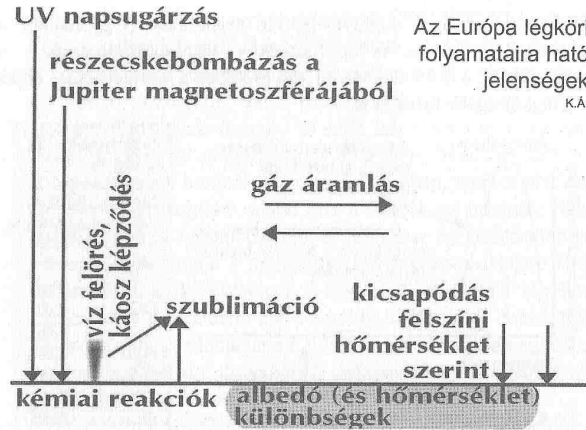
A Galilei-holdak fényviszaverési görbéi a látható és infravörös tartományokban. A behúzott függőleges vonalak a víz elnyelési sávját mutatják: az Io kivételével mindegyik Galilei-holdon láthatunk itt elnyelést, ami a víz-jég jelenlétére utal a felszíneiken. A vörös színt (0,7 μ) az Io veri vissza a legjobban.

8.3.3. Az Europa légköre

Az Europa ritka légkörének felszíni nyomása néhány száz billiomod atmoszféra. Ha földfelszíni légnyomásra préselnék össze, egy nagyobb futball stadionban elférne. A légkör fő összetevője az oxigén, forrása pedig a felszín, ahonnan a napsugárzás és a részecske-, valamint a meteorikus bombázás hatására vízmolekulák szabadulnak fel. A Nap ultrabolya sugárzásának hatására a vízmolekulák felbomlanak, és részben molekuláris oxigénné kapcsolódnak össze. Természetesen hidrogén is keletkezik, de sokkal könnyebb lévén gyorsan megszökik, ezért a légkör fő összetevője az oxigén marad. A gyenge gravitációs tér és a Jupiter magnetoszférájából érkező erős részecskebombázás miatt az atmoszféra gyakorlatilag folyamatosan szökik el az űrbe, és állandó utánpótlás nélkül elfogy.

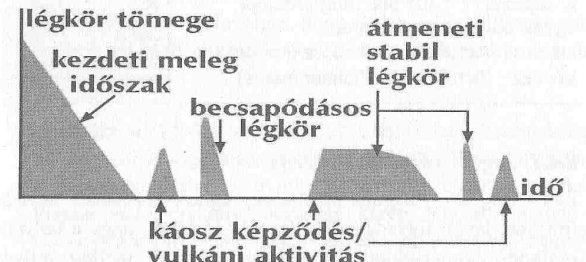
Az Europa légköre sokat változhatott a hold fejlődése során. Kialakulása után részben az összeálláskor felszabadult hó, részben a Jupiter erős kezdeti sugárzása miatt kiterjedt légköre lehetett. Ennek az ősi atmoszférának az összetétele nem ismert. Ha feltételezzük, hogy a hold belső differenciálódása során viszonylag gyorsan kialakult a jelenlegi szerkezete (azaz a felszín közelében már ekkor is sok víz és vízjég koncentrált), a meleg hatására a felszínét összefüggő óceán boríthatta, ezt pedig kiterjedt vízpára légkör vehette körül. Ekkor a légkör a legtöbb energiát az Europa belsejéből és a Jupiter sugárzásától kaphatta.

Emellett a légkör jelentős változásokon mehetett keresztül, azt is mondhatjuk pulzálhat. Jelenleg a külső hatások folyamatosan erodálják a ritka atmoszférát. Azonban előállhat olyan helyzet, amikor a légkör sűrűsége akkorára nő, ami csökkenti az erodáló hatásokat, az Europa egy stabilabb légkörre „vált át”. A becsapódások és az árapály fűtés is befolyásolja az atmoszférát. Egy nagyobb becsapódás nem csak az elpárologtatott és kirepült anyag révén gyarapítja a légkört. Érdekes lehet, ha összekötést hoz létre a felszín és a mélységi óceán között. Ezáltal a



Az Europa légköri folyamataira ható jelenségek K.A.

„kispriccelő” víz további forrása lehet a légkörnek. Hasonlóan egzotikus és kevésbé ismert következménnyel járhat a káosz területek keletkezése. Ezek kialakulásakor szintén folyékony víz juthat a felszínre, amely a káosz terület magasabb hőmérséklete révén gazdag „légkör forrássá” alakulhat.



Az Europa légkörének egy lehetséges időbeli fejlődési sémája K.A.

8.4. További jeges égitestek légköre

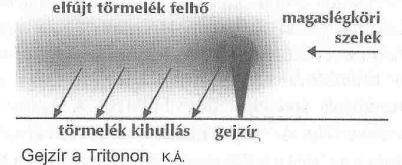
8.4.1. Triton: felmelegedés

A Triton légköre nagyon ritka, főleg a felszínen jégként is megtalálható nitrogénből, valamint metánból és egyéb szénhidrogénekből áll, amely jegek együtt halvány rózsaszín árnyalatúak.

A légkört gejzírek is táplálják. A felszíni áttetsző jégréteg átengedi a napsugarakat, amelyek mélyebben elnyelődnek, és melegíteni kezdik az ott található anyagot. A gáznyomás fokozatosan nő, míg végül áttöri a felszínt: gejzírként.

A gejzír kitérése metánport is magával ragad, ami a lassú tritoni légkörzés hatására a szélárnyékos irányban lerakódik, és sötét sávokat hoz létre.

A tritoni szelek a jelenleg több napsugárzást kapó dél felől északkelet felé mutatnak. A Tritonon felhőket és ködöt is megfigyeltek, utóbbi fotokémiai eredetű és általános a külső Naprendszerben. Az 1990-es években viszonylag gyors klímaváltozást figyeltek meg a Tritonon: a felszíni hőmérséklete tíz év



Gejzír a Tritonon K.A.

alatt 5%-kal, 37 K-ról 39 K-ra nőtt. A melegedés oka szezonális változás lehet: jelenleg a déli féltekén nyár van. Ott a hatalmas sarki jégsapka anyagának egy része szublimál a légkörbe, melyben így a megnő a légnyomás és áramlások indulnak el a hűvösebb (egyenlítőközeleli) területek felé. A szezonális változást bonyolítja a Triton nagy pályahajlása (157°, retrográd keringés).

8.4.2. Plútó: „jég-főnix”-légkör

A Plútó légköre is a felszíni jégből születik. Elméleti számítások alapján napközben (az igen erős excentricitás miatt perihélium és afélium között 41%-kal változik a napsugárzás erőssége) a Plútó felszínének nagy részét borító nitrogén- és kisrészt metánjég elszublimál, és légkört alkot. Ilyenkor – a Tritonnal megegyező naptávolságban – légkörének sűrűsége a korábbi érték sokszorosára nő. Később, a Naptól távolodván, (kb. 20 év múlva) ez a légkör részben elszökik, részben visszacsapódik a felszínre. A Plútó légköre legközelebb csak ismét napközben érve támad fel újra, a felszíni jegekből – saját „Főnix-porából”.

A felszíni hőmérséklet becslések szerint [2001] 40 K, a légkör középső részén 100 K (valószínűleg a légköri aeroszolok melegítő hatására). A felszínen igen különböző albedójú területek vannak, az egyenlítő környékén sötét sáv látható, máshol különféle jegek alkotják a felszínt. A plólusokon egyértelműen sarki sapkát figyelhetünk meg. A fényt különböző mértékben elnyelő felszínek egymástól eltérően melegednek fel, ami helyi szeleket okozhat. A Plútónak nem tudjuk, van-e mágneses tere, ami megvédené a napszálltól légkört.

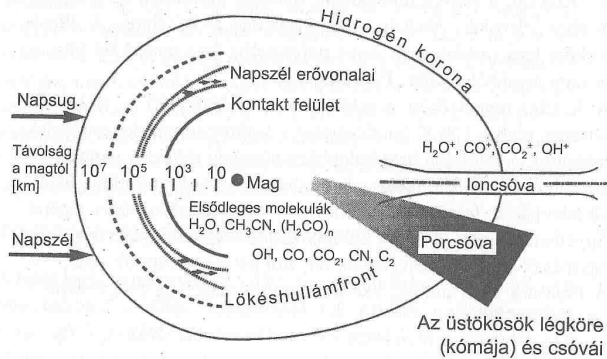
8.4.3. A Charon

A Charon, a Plútó holdja (vagy inkább a Plútó-Charon kettősbolygó rendszer kisebbik tagja) vízjégből áll, ami természetesen ilyen távol a naptól nem párologhat el: ez ott „száraz” anyagnak számít. Az igen közeli (20 ezer km-re keringő) Charon hold és a Plútó között egy gravitációs alapú molekulacsere is elképzelhető, amennyiben van lényeges légkörük. A megfigyelések azonban eddig nem mutatták légkör nyomát.

8.5. Az üstökösök légköre: kóma és csóva

Az üstökösök légköre napközben, az erős felmelegedés hatására jön létre, az üstökösben található illóanyagokból és porból. Mivel gravitációs erejük kicsiny, a napszél pedig közvetlenül hat rájuk, légkörük gázai szabadon távozhatnak, és így nagyméretű, diffúz gázburkot alkotnak körülötte (kóma). A kómát alkotó gázmolekulák és atomok a napsugárzás hatására egyszerűbb molekulákká, atomokká, ionokká disszociálnak. A kóma gázanyaga kölcsönhatásba lép a Nap sugárnyomásával és a napszéllel. A Nap sugárnyomása a kis porszemcsékre a Nappal ellentétes irányú erővel hat, amelyek így a Nappal ellentétes irányba mozdulnak el. A fénynyomás hatására lemaradt porszemcséknek a hosszú, enyhén görbülő sorát nevezzük porcsóvának. Az ioncsóva ionizált részecskékből áll, amelyeket a napszél töltött részecskéi ragadnak magukkal, ezek alkotják az egyenes ioncsóvát. (A csóvák hossza akár a több millió, esetenként több tízmillió kilométert is elérheti.) Minden egyes napközelség alkalmával az üstökös sok anyagot veszít, így egy idő (azaz számos Nap-megközelítés) után fokozatosan kifogy az illóanyagokból. Az ilyen „kiégett” üstökösök később egyszerű aszteroidaként folytatják pályafutásukat. A külső-Naprendszerből azonban folyamatosan újabb „friss”, fagyott üstökösök kerülnek be a belső-Naprendszerbe.

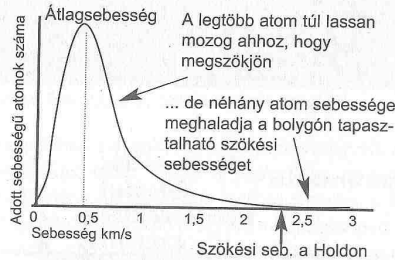
Az üstökösök jégtartalma azért is fontos számunkra, mert elméletek szerint a Földre csapódó üstökösök anyaga a a földi óceánok vízkészletéhez is jelentősen hozzájárult.



8.6. A légkör, a hőmérséklet és a gázok jellemzőinek összefüggései

Egy gázmolekula annál könnyebben szökik meg egy bolygó felszínéről, minél kisebb a bolygó gravitációs ereje, minél könnyebb a molekula és minél nagyobb a gázmolekula sebessége. A magnetoszféra nélküli égitestek légkörét a napszél folyamatosan erodálja (a légkör tetejéről

elragadja az igen könnyű H, He atomokat). (Ugyanakkor a napszél ionjai be is épülhetnek – implantálódhatnak – a légkörökbe.) A Merkúr és a Hold esetében a napszél ionjai adják a légkör egyik forrását is.



Ha a gázmolekula átlagos sebessége ötödrésze az égitesten mért szökési sebességnek (mely ötödrészek a Földnél: 2,2, a Holdnál: 0,4, a Marsnál: 1), az adott gáz fele 1 milliárd év alatt megszökik. Az értékek átlagosak, tehát a molekulák egy része sokkal gyorsabb, más része sokkal lassabb.

A napszél (v = 400 000 m/s) eróziója egyes bolygók légkörében

Mars 3×10^{25} ion/s. (Fobosz 2 mérés)
Vénusz 7×10^{26} ion/s (Pioneer mérés)

Gázmolekulák átlagos sebessége (km/s) 300 K-en.
(95 K-en az értékek a 300 K-es érték 56%-a)

	km/s
CO ₂	0,41
N ₂	0,52
H ₂ O	0,64
CH ₄	0,68
Ar	0,43
O ₂	0,48
H ₂	1,93
He	1,37
SO ₂	0,34
Ne	0,61
NH ₃	0,66
CO	0,52
Na	0,57
K	0,44
C ₂ H ₆	0,50

(v.ö.: szökési sebességek táblázata)

8.6.1. Jeges, kőzetek, légkörök

Egy anyag attól függően alkotja egy égitest kőzeteinek anyagát (magma, láva), folyadékszféráját vagy légkörét, hogy a bolygón uralkodó hőmérsékleti és nyomásviszonyok mellett milyen halmazállapotban fordulhat elő. Ennek megfelelően a Földön a kőzetek anyaga szilikátos, a folyadékszféra anyaga víz, a légkör pedig oxigén, nitrogén stb. A külső-Naprendszer szilárd felszínű égitestjein az illóanyagok azok, melyek ott „illékonyak”: a víz tehát már száraz kőzetalkotó, a felszíni jeges pedig azok az anyagok, melyek a Földön gázneműek: nitrogén, metán stb. A Titánon a hőmérséklet a metán hármaspontja közelében van, így a CH₄ mindhárom halmazállapotban előfordulhat (akárcsak a Földön a víz). Az ilyen, jeges égitestek légkörét azok a gázok alkotják, amelyek ilyen alacsony hőmérsékleten sem fagynak meg. Itt a légkör hőmérséklete télen sokszor a légkört alkotó gázok fagyáspontja alá csökken, és jégként kicsapódik a felszínre. Nyáron aztán ismét elszublimál és légkört alkot.

Számítások:

Szökési sebesség: $v = (2Gm_p/R)^{1/2}$

R: sugár, m_p : bolygó tömege, G: gravit. áll.: $6,67 \cdot 10^{-8}$ cm³/g/s²

Gázmolekulák közepes sebessége: $v = (3kT/m)^{1/2}$

k: Boltzmann-áll. $1,380658 \cdot 10^{-23}$ kg m²/s²K

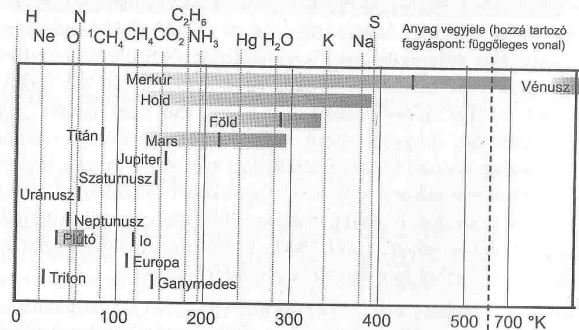
T: absz. hőmérs. (A Föld átlaghőmérséklete: 287 K)

m: a molekula tömege (azaz rel. molekulatömeg/6 $\cdot 10^{23}$)

Forrás- és olvadáspontok a Föld felszínén (Kelvinben, 1 atm. nyomáson):

Forr.p. K	Olv.pont K	Forr.p. K	Olv.pont K
Bazalt olvadék	1300-1500	H ₂ O	373
Andezit olvadék	1100-1300	NH ₃	239
Dácit olvadék	1050-1250	C ₂ H ₆	101
Riolit olvadék	950-1100	CH ₄	90
Komatiit olvadék	1600-1800	CO ₂	148
C	5103	Ar	87
Si	2953	O	90
Fe	3273	N	77
Ni	3003	Ne	27
Ca	1713	H	20,4
Mg	1380	He	4,2
Na	1165		
K	1033		
S	717		
Hg	630		

Forr.p.: E hőmérséklet felett gáz halmazállapotú. Olv. p.: Ez alatt szilárd



Anyagok fagyáspontja (a Földön) és bolygótetek felszíni hőmérséklete.

A pettyezett vonalaktól balra az egyes anyagok fagyott, attól jobbra gáz vagy folyékony halmazállapotúak (az érték és halmazállapot nyomástól függően változhat.) Az ¹CH₄ érték a Titán viszonyai mellett érvényes (1,6 bar), a CO₂-é 6 mbar mellett (Mars). Az egyes égitestek átlagos felszíni hőmérsékletét vastag vonal jelzi az égitest neve mellett, a hőmérsékleti változékonyságot szürke sáv mutatja.

9. A LÉGKÖRÖK FEJLŐDÉSE

9.1. A földi légkör fejlődése

Ma egy 4,5 milliárd éves fejlődés pillanatnyi – és nem is végső – állapotát láthatjuk az egyes égitestek légköreire tekintve. A légköri gázok mennyisége függ attól, hogy mennyi gázolt ki a Föld (vagy egy bolygó) besejéből, mennyi oldódott a tengervízben (ha van tenger), mennyi épült be a kőzetekbe és mennyi szökött az űrbe.

I: A Föld anoxikus (redukáló, elsődleges) légköre

Hádészi idő/Pre-archai: (4,6–3,8 milliárd éve)

A Föld keletkezésekor, még a szilárd felszín megjelenése előtti első, forró légkörének gázai két fő forrásból táplálkoztak: a becsapódások során megolvadó kőzetek kigázolásából és a napszél atomjaiból.

A napszélből a légkör H-t és He-t fogott be, amelyeket igen hamar tovább is fűjt a napszél és a meteorbecsapódások „szele”. (Még nem volt magnetoszféra, mely védett volna a napszélétől, mert a Föld belseje még nem differenciálódott. A mag-köpeny szétkülönülés kb. 4,4 milliárd éve fejeződött be, azaz szinte az 50-70 millió év alatti összeállással egyidejűleg történt.)

Már az összeállás idején, mire a Föld elérte végső méretének 30%-át, a meteoritok becsapódásai nyomán, a becsapódó testek és a felszín anyagának elpárolgásából elkezdett kialakulni a másodlagos légkör. Sűrű légkör volt, melyben erős üvegházhatás

az amúgy is forró felszín hőmérsékletét 1200-1500 °C-ig növelte (ez a bazaltos kőzetolvadék hőmérséklete). A felszín megolvadt, a kőzetek pedig képesek voltak magukhoz kötni a víz egy részét. A forró gőzlégkör több tízmillió évig létezett, míg a becsapódások gyakorisága – és ezek folyamatos hőtermelése – nem csökkent le annyira, hogy már nem akadályozta a víz kicsapódását. A bombázások végső fázisában, amikor már csak kevesebb, de nagyobb találat érte a Földet, az óceánok víze a keletkező hő (a becsapódás helyén több ezer fok) miatt többször elpárologhatott majd a nyugalmas időszakokban lehűlve ismét kicsapódhatott (kiesőzhetett) a légkörből. A Holdat létrehozó becsapódást nem élhette túl a korábbi légkör vagy óceán, így a folyamat újra kezdődhetett. A földköpeny anyagának egy része is elpárolgott ekkor, de átmeneti „kőzetgáz”-légköre hamar újra „kicsapódott” a felszínre.

4,0–4,4 milliárd éve a számtalan becsapódás keltette porfelhők és az állandó kigőzölgések hatására a légkör valószínűleg többször is átlátszatlanná vált. A sűrű, redukáló légkör külső részén az UV sugárzás hatására létrejövő fotokémiai szmog is átlátszatlanná tehetette az atmoszférát (ma a Titán esetén talánuk hasonló jelenséget). A fotoszintézis ekkor lehetetlen volt.

A Föld tengelyforgási ideje 4,4 milliárd éve a kezdeti 5-6 órásról 10 órára lassult. Lehetséges, hogy ekkor – a gyors forgás miatt – a mianál több cirkulációs cella is kialakult, akárcsak a mai Jupiteren.

Archaikum (3,8-2,5 milliárd éve) A folyamatos becsapódások okozta állandó kigázolás nyomán létrejött légkörben a nyomás a becslések szerint 5-70 atm lehetett. A felszínen időnként visszaolvadó, vékony, bázikus kéreg lehetett, melyet a becsapódások át- és átütöttek. A közelmúltban találtak is egy 3,4 milliárd évvel ezelőtti, nagyméretű becsapódást bizonyító nyomokat (circon, iridium). A becsapódások ritkulásával egyre nagyobb területeken szilárdult meg a kéreg anyaga a felszínen. A még erőteljes radioaktív hőtermelés miatt a mainál erősebb volt a vulkáni aktivitás. Ezek a belső folyamatok: az intenzív magmatizmust kísérő kigázosodás adta a légkör forrását (H₂, CO, CO₂, H₂S, H₂O, CH₄, NH₃) – az összetétel hasonló a mai Hawaii típusú forrófolt-vulkánoknak a földköpeny mélységéből érkező gázai összetételéhez.

A felszíni hőmérséklet csökkenésével a kezdetben sűrű és forró vízgőz-széndioxid légkörből a víz (eszként) kicsapódott. A légkör lassan ritkult és – a meteorbombázások elűtével – nőtt átlátszósága. A levegő fő összetevője a CO₂ maradt. A hatalmas esők nyomán a folyékony víz egyre nagyobb területeket hűdített meg. Lehetséges, hogy az egész földfelszínt elborította a víz

(ekkor még nem léteztek kontinensek), s csak a becsapódásos kráterek peremei voltak szigetgyűrűként szárazon. A tengerek mélyét vulkánok és lávafolyások borították. (Esetleg az ioihoz hasonló hegy-blokkok?)

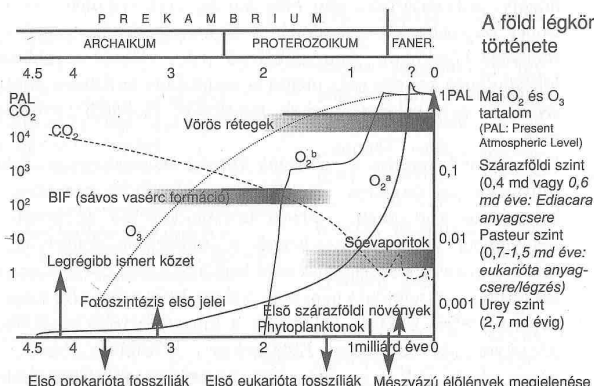
A közeli (mai távolság felé néző) Hold árapályereje és az időnkénti becsapódások meglehetősen felkorbácsolták az óceán vizét. Vízen lerakódott üledékekre már 4-4,2 milliárd éves történelmes eredetű Nyugat-Ausztráliában talált circon is utal. Ennek lekerekítettsége jelzi, hogy bezáró kőzete, a kvarc, vízben rakódott le. Ekkor tehát már kiterjedt vízóceán borította a Földet. A hőmérséklet a víz forráspontja alá csökkent. 3,5 milliárd éve már komplex ökoszisztémák léteztek a talán 70°C-os óceánokban.

A halvány ősnap paradoxon. A Nap fősorozati életének elején 30%-kal kevesebb energiát sugárzott, mint ma (Gough elmélete, 1981). Ennek alapján a Földnek az első 2 milliárd évében fagyottnak kellett volna lennie, a geológiai bizonyítékok azonban folyékony vízóceánra utalnak: valószínűleg az üvegházhatás erősebben működött, hiszen a légkörben több volt a szén-dioxid, és az ammóniával együtt talán elég volt a bolygó melegen tartásához. Mindenesetre még nem eldöntött a vita, hogy végül is az ősi Föld forró vagy hideg volt-e, tehát az itt leírt állításokról bármikor kiderülhet, hogy épp az ellenkezőjük az igaz.

Az élet kialakulásához redukáló légkörre volt szükség (ennek hatására jöhetnek létre a megfelelő szerves molekulák); a légkör reaktív is maradt egészen kb. 2 milliárd évvel ezelőttig.

A többi Föld-típusú bolygón a CO₂ nem tűnt el a földihez hasonló mértékben a légkörből. A Földön viszont a CO₂ csökkenésével csökkent az üvegházhatás és a földi átlaghőmérséklet, a hidegebb víz pedig még több CO₂-t tudott oldatban tartani (pozitív visszacsatolás). Jégsapkája már valószínűleg 2-2,5 milliárd éve is volt a Földnek (erre glaciális üledékek, jégkarcok utalnak: huroni jégkor), tehát a szén-dioxid (és nitrogén) légkörnek elég ritkának kellett lennie már 2,5 milliárd éve is, azaz a hőmérséklet a Földön immár fagyponthoz hűlt. Megkezdődött az oxigén (és nitrogén) -tartalom növekedése. 3,8-2,5 milliárd éve indult be a fotoszintézis és az oxigéntermelés. Ez a fotoszintézis azonban „máshogy működött”, mint a mai, hisz az akkori oxigénszinthez kellett igazodnia.

Hogy csökkent a CO₂ -tartalom és került mind több O₂ a légkörbe? A vulkáni kigőzölgések (vagy az óceán elpárolgó) víze fotodisszociációval, a Nap UV sugarai hatására alakul oxigénné. Az oxigénmolekulák O₃-á alakulnak, a H⁺ ionok pedig elszőknek. Vízpára jelenlétében ez a folyamat az élet nélkül is

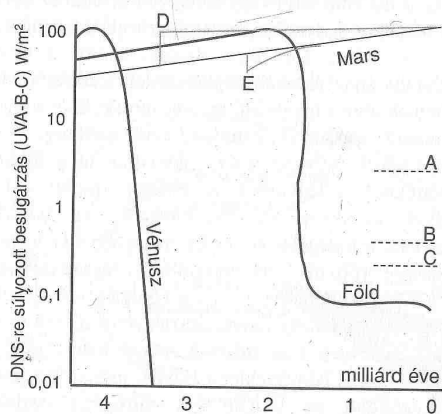


Fenn: A Schidlowski-féle görbe (a légköri oxigénszint változása), Báldi (1971-1995)⁹ és Kasting-Holland-Kump nyomán (utóbbi *dóltlen*). A O₂^b, O₃ és CO₂ görbék forrása R. P. Wayne (Chemistry of Atmospheres, OUP, 1991); a CO₂ görbe 0,6 milliárd év és ma közti forrása: Berner, 1990 Science 249:1382) (Az O₂^a és O₂^b görbék ugyanarra vonatkoznak, de más szerzők szerint)

bekövetkezik. Az ózonréteg az UV sugarakat elnyeli, ami tehát önszabályzóvá teszi a folyamatot. 0,01 PAL-nál már 30 cm vízréteg elegendő volt a káros UV sugarak kiszűrésére. Ekkor jelentek meg a felszínközeli vizekben élő eukarióta fitoplanktonok, amik még több oxigént juttattak a levegőbe.

Az archaikumban így keletkezett oxigén azonban az ásványok oxidálására fordítódott, folyamatosan kivonódva a légkörből. Az első oxigénfogyasztók a vastartalmú kőzetek voltak. Ilyen pl. az oxigéndús sekély vizekben keletkezett *Banded Iron Formation* (BIF): vasérclemezes tüzkő (3,7 milliárd éve jelentek meg (Ny-Grönland, Isua), gyakorivá 2-1,8 milliárd éve váltak). 1 milliárd évvel fiatalabb BIF nem ismert, azaz az oxigén minden fellelhető Fe^{++} iont magnetit, majd hematit formájában (mindkettő oxidált vas) kicsapott a tengervízből, mely így vasércként kiülepedett. A vas kiülepedése után egyre több oxigén halmozódott fel a vizekben, majd innen kijutva a légkörben is.

Az oxigénszint légköri megugrását jelzik a szárazföldi oxidáció nyomai: Az ún. vörös rétegek is oxigénre utalnak (2,5 milliárd éve jelentek meg, 1,8 milliárd évtől gyakoriak). Ezek szárazföldi üledékes kőzetek (homokkő és iszapkő), melyek szemcséinek egy



Bolygók fotobiológiai története: Az UV sugárzás megemelkedése különféle feltételezett esetekben (modellszámítások)

FÖLD: A: K/T (kréta-tercier földtörténeti határon történt) méretű becsapódás esetén az ózonpajzs 85%-a eltűnik B: Sarki ózonpajzs-leépülés egy 10 parszek távolságra levő szupernóva felrobbanása esetén C: Tunguz-méretű test becsapódása (egyik féltéke) esetén.

MARS: D: A légkör összeomlása esetén a sugárzás gyors emelkedése, majd lassú stabilizálódás következik. E: Egy epizodikus, áradás kiváltotta CO_2 -kigázódás a marsi légkörbe a felszínre érő sugárzás némi csökkenését eredményezi.

VÉNUSZ: Az üvegházhatás és a sűrű légkör (ha ez a szcenárió igaz) rögtön az első párszáz millió évben teljesen elzárja az UV sugarak útját a felszínre. (Cockell, 2000. nyomán)

részt hematit (Fe_2O_3) vékony vörös hártója vonja be. Ez a vas a növényzet hiánya miatt a mainál nagyobb erózió hatására bemosódott a tengerekbe, és ott leülepedett.

A hidroszféra sok CO_2 -t tart oldatban (szénsavként). A széndioxidot lassan, évmilliárdok alatt folyamatosan fotoszintézissel oxigénné alakítják az élőlények, az oxigén kis részét és a szén pedig magukba építik. A mai oxigénszint kb. 10%-a (0,1 PAL) idején kialakult az ózonpajzs (lásd: *ábra, balra lent*), mely lehetővé tette a szárazföldi életet; ez – különösen a karbon időszak mocsaras erdői – újabb lökést adtak az oxigénszint emelésének.

Proterozoikum (2,5-0,6 milliárd éve) Kb. 1,5 milliárd évtől ismertek és 0,6-0,8 milliárd éve váltak gyakorivá a karbonátos kőzetek, elsősorban a dolomit, ami szintén csökkentette a légköri CO_2 -t. A korai cyanobaktériumok (sztromatolitok 3,4 milliárd éve, Ny-Ausztrália) által termelt oxigén csak akkor kezdhetett végre a légkörben felhalmozódni, mikor a kőzetek már „kioxidálódtak”, mert addig minden szabad oxigént ők fogyasztottak el.

1 milliárd éve már nem volt BIF és elszaporodtak a sztromatolitok (kék-zöld algák építette lemezes szerkezetű mészkő, ritkábban dolomit vagy tüzkő építmények). Annyi oxigén már volt – a fotodisszociációból – az óceánokban, amennyi a fotoszintézishez kell. A klorofill előállításához ugyanis eleve oxigénre van szükség. A fotoszintetizáló sztromatolitok virágkorában nagy jégkorszakok köszöntöttek be (1-0,6 milliárd éve), amiket részben a hirtelen csökkenő CO_2 okozott. (A későbbi permokarbon jégkornál inkább a pályalemegek szerencsétlen összegződése volt az okozó).

Az újproterozoikum egyenlítőig lenyúló jégtakaróinak („globális hólabda elmélet”) korszaka után az élet fejlődése új lendületet kap, s megjelennek a mérsékelt és meleg évszakok élőlények.

II. Az oxidáló légkör

Fanerozoikum (0,6 milliárd évvel ezelőtől máig)

A 600 millió évvel ezelőtti jégkorszak idején a hideg víz sok CO_2 -t tudott oldatban tartani. A vizek melegebbé válásával (melegebb vízben több CO_2 válik ki) jelentek meg (robbanásszerű gyorsasággal) a mérsékelt és meleg évszakok élőlények, melyek a széndioxidot vázukba építve vonják ki az óceán vizéből. Később ezek karbonátos kőzetekké alakultak. Így, mészkőként ($CaCO_3$) (pl. sztromatolitoktól) a széndioxid átkerül litroszférba, mely „pufferként” tárolja.

A szuperkontinens-világóceán kettős idején (kb. 1/2 milliárd évente, amikor a kontinensek egyesülnek) a klíma stabilizálódik. A kontinens belsejében kiterjedt arid (száraz) területek találhatóak, a

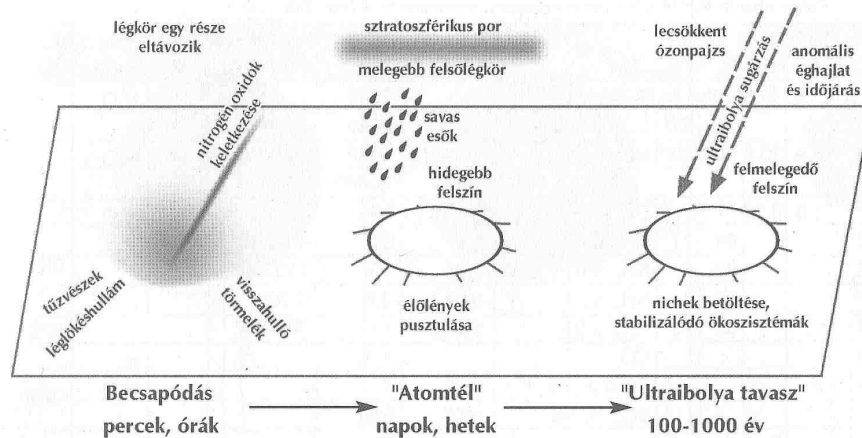
világóceánban teljes körű áramlások tartják kiegyenlítve a föld hőmérsékletét.

A devonban a megjelenő szárazföldi növényzet gyors elterjedése kivonta a CO_2 -t és dúsította a légkör O_2 tartalmát. Ez a hatás a karbonban volt a legintenzívebb, amikor a hatalmas erdőségek akár a mai szintet meghaladó értékre növelhették a légkör oxigéntartalmát. A tengerekben ebben az átmeneti időszakban a felszínközeli vizek oxigéndúsak, a mélyek viszont anoxikusak voltak. Az elmúlt évszázmilliókban nagyjából változatlan oxigéntartalmú a légkör.

Tömeges kihalások. Az elmúlt 600 millió évben 5 jelentős kihalásra utalnak az ősmaradványok. A földi élővilágot megtizedelő – és az evolúcióra alapvető hatással levő – események időszakos hatással lehettek a légkörre is, illetve közvetve épp a légköri jelenségek okozhatták a kihalások egy részét. A becsapódás elméletét először 1970-ben a devon végi kihalásra javasolta McLaren, de csak 1980-ban Alvarez és munkatársai kutatásai nyomán – melyben az elmélethez bizonyítékot is találtak – kezdték elfogadni. Ma már a devon végi kihalást (365 millió éve) több becsapódással, a perm / triász kihalást (P/Tr trilobiták korának vége 250 millió éve), és a kréta/tercier kihalást (K/T, dinoszauruszok korának vége 65 millió éve) egy-egy becsapódással magyarázzák.

A becsapódás első hatásaként a becsapódás helyén minden anyag, a kőzet is elpárolog. A kilöködött törmelék távolabbra is eljut, másodlagos krátereket hoz létre, földrengéseket okoz, ezzel növelve a katasztrófát, ami még mindig csak regionális szintű. Ennél szélesebb körre terjednének ki azok a tüzek, melyeket a robbanás hője okoz. Ami globálissá teszi, először a robbanás lökéshulláma keltette is meghaladó hullámmagasságú szökőár, mely sekélytengeri és tengerparti élővilágot tizedelheti meg.

Egy számítás szerint a robbanás keltette hő hatására a légkör nitrogénje és oxigénje salétromsavvá (HNO_3) egyesülne. A becsapódás környékén 1 pH-jú sav hullana alá az égből. A sekélytengeri vizek elsavasodnának, a fitoplankton elpusztulna. A tüzek hamuja és a becsapódás által légkörbe lökött por eloszlana a légkörben és a napfényt nem engedné át. A felszínre alig jutna le napfény, teljes sötétség lenne, így a fotoszintetizáló szárazföldi növények (és az óceáni fitoplankton) is elpusztulnának. A növények, spóráik és magjaik révén, később újra kikelhetnek, de a növények hiánya miatt időközben éhen vesztett növényevők már nem. A teljes sötétség időszakát a devon kihalás esetén 6 hónapra teszik. A sötétség alatt fény nem juthat le a felszínre, tehát minden fény elnyelődik a légkörben vagy visszaverődik az űrbe: a bolygó a világűrben egy egyenletesen ragyogó gömbnek



Egy becsapódás lehetséges következményei (K.Á.)

látszódná. Az elméletek szerint két éven át nem nőnek fagypont fölé a felszíni hőmérséklet.

A globális lehűlés alapvető hatással volt az élővilágra. (a devon végi kihálás példáján) elsősorban a trópusi sekélytengeri élőhelyek lakói pusztultak el: ők voltak a legérzékenyebbek a lehűlésre, mert állandóan alig változó meleg hőmérsékletre voltak szoktak. A hűvösebb éghajlatokon élő tengeri élőlények az egyenlítő közelébe vándorolhattak. A szárazföldi, édesvízi élőlények sokkal nagyobb tűrés-határral rendelkeztek, így közöttük több túlélő volt.

A becsapódás utáni „atomtél” csak a kezdet, mert „ultraibolya tavaszban” folytatódik. A légköri ózonpajzs megsérül, ami az élőlények számára csak a globális porfelhő feloszlásával derül ki: a napfénytől elszokott, ezért védekezésre képtelen növényeknek és állatoknak az „atomtél” alatt amúgy is legyengült szervezetét sokszoros erővel támadta

A Föld mai, oxidáló légkörének keletkezése

Az eredeti, vulkáni eredetű vízgőz hidrogénné és oxigénné alakul, a hidrogén az űrbe szökik: **fotodisszociáció** (a légkör felső rétegeiben vagy ózonpajzs híján máshol is). $2\text{H}_2\text{O} + \text{UV fényenergia} \Rightarrow 2\text{H}_2 \uparrow + \text{O}_2$. (A frissen felszabadított oxigén a metánnal reakcióba lépve szén-dioxidot és újabb vizet; illetve ammóniával nitrogént és vizet eredményez) $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 \Rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ $4\text{NH}_3 + 3\text{O}_2 \Rightarrow 2\text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$

(+A széndioxidból **fotoszintézis** hatására oxigén keletkezik.)
 („zöld növény” fotoszintézis):
 $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} + \text{fény} + \text{klorofill katalizátor} \Rightarrow (\text{CH}_2\text{O}) + \text{O}_2$

meg az UV sugárzás. A számítások szerint a P/Tr porfelhő 390 nap alatt ülepedett ki, ekkor lehetett ismét az eredeti szinten az UV sugárzás. Újabb 300 nappal később viszont az közben fogyó ózonpajzs miatt már a felszínre elerő káros UV sugárzás intenzitása már a kétszeresére nőtt. Az UV sugárzás ekkor a normálisnál 500-100-szer gyakrabban támadta meg a DNS-t, és hozott létre mutációkat. A K/T határon bekövetkezett becsapódás-kor a hőtől elpárolgó mészkőből és anhidritből elpárolgó széndioxid és szulfátok savas esőt és szulfátszrogot produkálhattak, mely utóbbi feloszlásáig védte az élővilágot. Utána viszont az UV sugárzás végzett azokkal, akik addig nem pusztultak el.

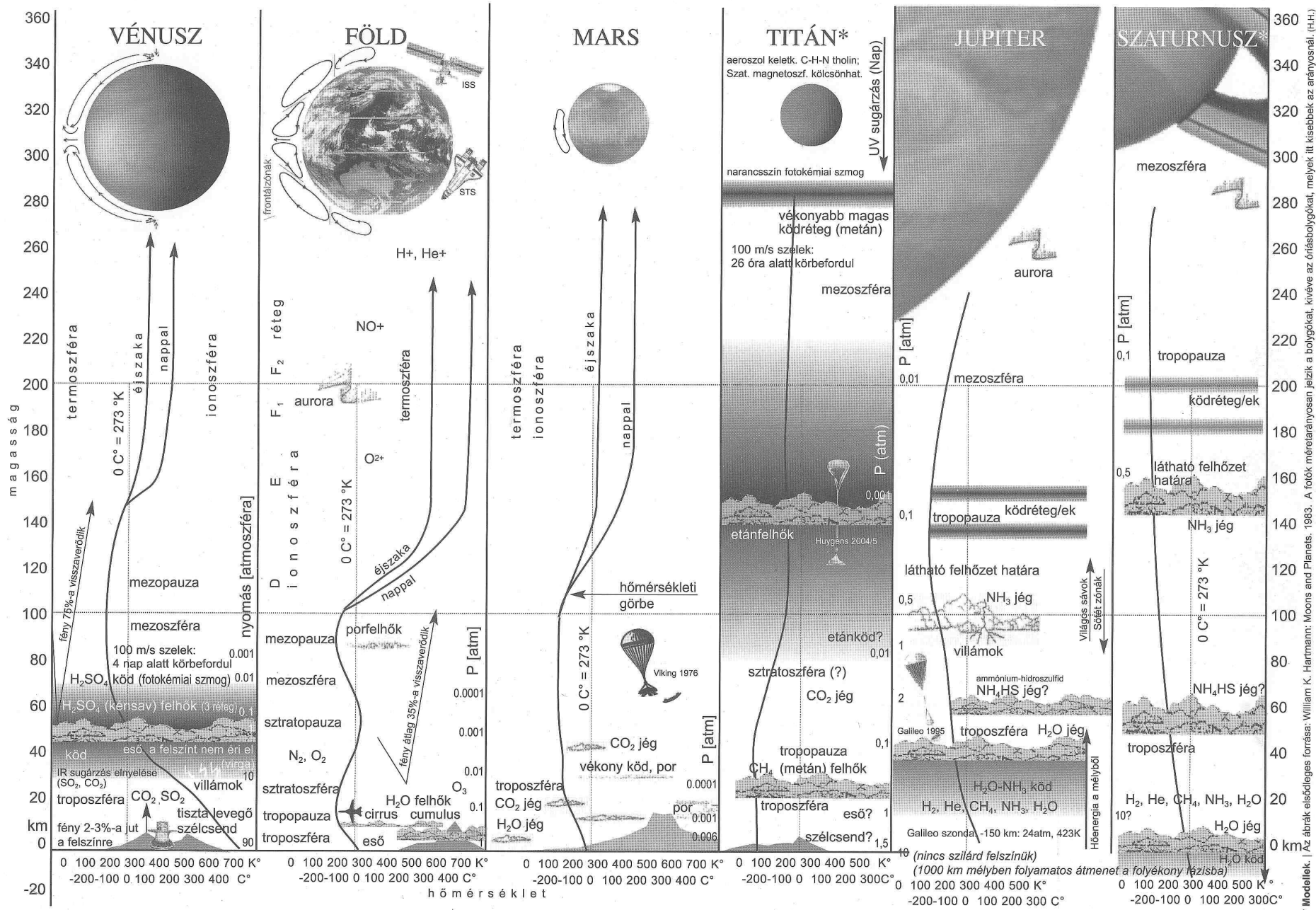
A földi légkör távoli jövője

Hosszú távon nőhet-e tovább az oxigénszint? Ha elérné a 35%-ot, minden egyes villámlás még a nedves növényzetből is hatalmas tűzvészeket okozna. James Lovelock Gaia elmélete szerint a bioszféra „nem engedi”, hogy túl sok (és ezzel veszélyes) oxigén legyen a légkörben.

A Nap életének elkövetkező 5-7 milliárd éve alatt valószínűleg egyre nő a fényessége. Nem tudni, a „Gaia”-hatás ezt meddig képes kompenzálni. (Visszacsatolás: a növekvő hőmérsékletre erősebb lesz a párolgás, több a felhő, ami több fényt ver vissza (globális „borultság” esetén akár 80%-ot is), tehát kevesebb napsugárzás éri a felszínt, csökken a párolgás stb. Hasonlóan a melegben burjánzó több növény több CO_2 -t fogyaszt ill. von ki a légkörből, ami csökkenti az üvegházhatást, tehát hidegebb lesz.) Végős soron azonban a Nap felfűvődik vörös óriássá, előbb az óceánok párolognak el, majd a növekvő hő hatására a légkör is az űrbe szökik, a kőzetek az egész felszínen megolvadnak. A külső bolygók holdjain (így a Titánon) viszont pár tíz vagy száz millió évig is a mai földihez hasonló klímaviszonyok válnak lehetségessé. Ezután a Nap fehér törpévé zsugorodik, és a számítások szerint energiája annyira lesz csak elég, hogy a Föld felszínét 56 K-re fűtse. A kihűlő Föld még forró láváinak kigázoló anyaga hamar a felszínre fagyva. A Földet ezek a jeges és megszilárdult lávatarak borítaná, melyre már csak az időnként becsapódó testek válnak kráterüket.

Irodalomjegyzék

- AHRENS, C. D., 1994: Meteorology today. West Publishing Company, St. Paul, USA.
- BAKICH, M. 2000. The Cambridge Planetary Handbook. Cambridge University Press.
- BARTHOLY J., WEIDINGER T., 1997: Az általános cirkuláció mozgásrendszerei. in: Pannon Enciklopédia, Magyarország Földje (Szerkesztette: Karátson D.), Kertek-2000 Könyvkiadó, Budapest, 225. oldal.
- BEATTY, K. - CHAIKIN, A. 1990.: The New Solar System. Cambridge University Press.
- COCKELL, C. S., 2000. The ultraviolet history of the terrestrial planets - implications for biological evolution. Planetary and Space Science 48. pp203-214
- CZELNAI R., GÖTZ G., IVÁNYI Zs., 1983: Bevezetés a meteorológiába II. A mozgó légkör és óceán, Tankönyvkiadó, Budapest.
- DOTT, R. H. - BATTEN, R. L. Evolution of the Earth. McGraw-Hull Book Company.
- GÖTZ G., RÁKÓCZI F., 1981: A dinamikus meteorológia alapjai, Tankönyvkiadó, Budapest.
- GRINSPON, D. H. 1997. Venus Revealed. Addison-Wesley Publishing Company.
- GYURÓ GY., WEIDINGER T., 2000: Felhők. Zöldszívűk. A Zöld Szív Ifjúsági Természetvédő Mozgalom Lapja. 13. szám, 4. oldal.
- HARTMANN, W. K., 1983. Moons and Planets. Wadsworth Publ. Company
- MARSH, W. M. - DOZIER, J., Landscape. An introduction to Physical Geography. John Wiley et Sons.
- McGHEE, G. 1996. The Late Devonian Mass Extinction Columbia University Press
- MÉSZÁROS E. 1997.: Levegőkémia. Veszprémi Egyetemi Kiadó.
- PÉCZELY GY., 1981: Éghajlatlan, Tankönyvkiadó, Budapest.
- The Atmosphere, 1989: Mirage Publishing, Amsterdam, The Netherlands.
- RÁKÓCZI F., 1993.: Planetáris meteorológia. Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar - Nemzeti Tankönyvkiadó
- WEIDINGER T., IVÁNYI Zs., BARCZA Z., 1995: A planetáris határreteg szerkezete és modellezése. A levegőkörnyezet szabályzás-orientált modellezésének perspektívái c. Szimpózium kiadványa, Budapest.
- WILLIAMS, J., 1992: The Weather Book. USA Today, Wintage Books, New York.



* Modellek. Az ábrák elsődleges forrása: William K. Hartmann: Moons and Planets, 1983. A fotók méretarányosan jelzik a bolygókat, kivéve az órásbolygókat, melyek itt kisebbek az arányosnál. (H.H.)



A Mars légköre



A Titán légköre



A Föld légköre az űrrepülőről



A Triton légköre



Sarki fény az Antarktisz felett

COMMANDER JOHN BORTNIAK, NOAA CORPS, 1979



Tornádó



Portölcser



Földi felhő alulról



A Vénusz



Tornádók (víztölcsérek) a tenger (Bahama-szigetek) felett

NOAA HISTORIC NWS COLLECTION



Földkelte a Holdról nézve

APOLLO



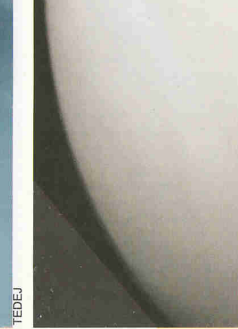
Tornádó



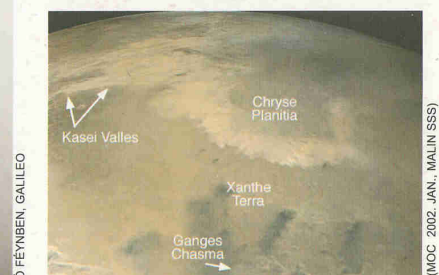
Portölcser



Földi felhő alulról



A Vénusz



Porvihar a Marson

(MCC 2002. JAN., MALIN SSS)



A Jupiter felhőzete

CASSINI ORBITER 2000. OKT. NASA/JPL



Napnyugta a Marson

PATHFINDER