

METEOROLÓGIAI ALAPISMERETEK

Állapotjelzők

A légkör állapotát az állapotjelzők írják le. A legfontosabbak a:

- *Légnomás*, a felületegységre eső nyomóerő. Mértékegysége a meteorológiában a hektopascal (hPa), régebben a *millibar*, illetve a *higany mm* (1 mbar = 1 hPa = 0.75 Hgmm). A normál (tengerszinti) légnyomás 1013,25 hPa (\approx 760 Hgmm). Térképeken az egyenlő légnyomású helyeket összekötő vonalak az *izobárok*.

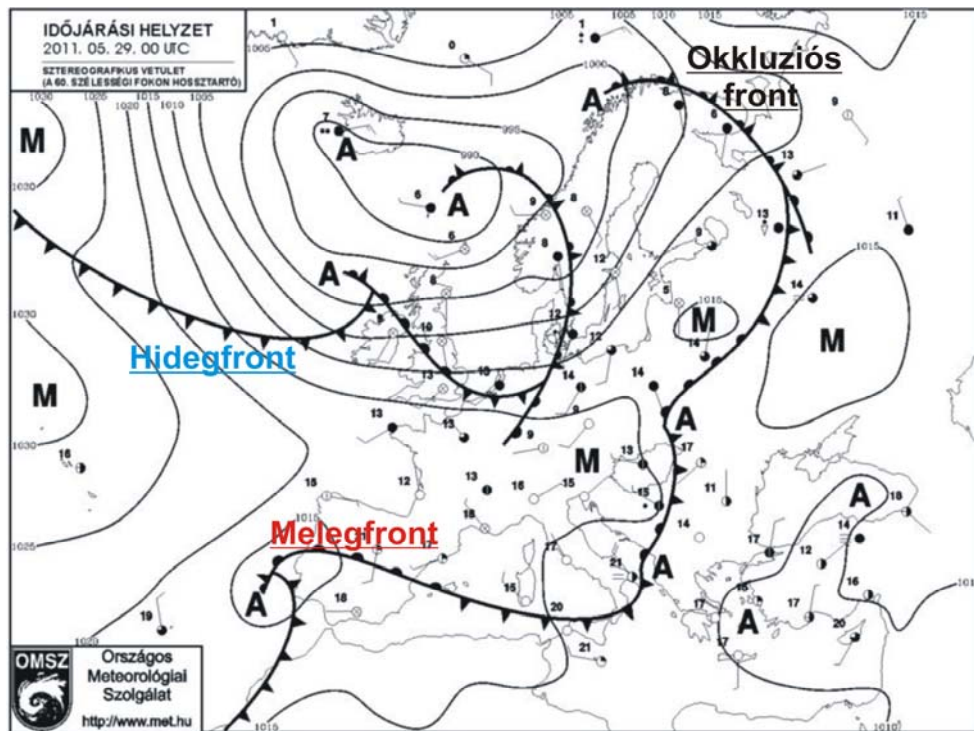
- *Hőmérséklet*, a gyakorlatban Celsius-fokban mérjük. Számításokban a Kelvin-fokot is alkalmazzuk, amely: $T[\text{K}] = T_0 + t$, ahol $T_0 = 273^\circ\text{C}$ az abszolút nulla fok, t pedig a $^\circ\text{C}$ -ban mért hőmérséklet.

- *Szél*, háromdimenziós vektormennyiség. Mélni csak a vízszintes sebességösszetevőjét tudjuk. Nagy térségű folyamatoknál a függőleges összetevő kicsi.

- A nedves levegő *vízgőztartalma* kifejezése közvetlenül vagy közvetve lehetséges. A gyakorlatban használt relatív nedvesség az $f = 100 e/e_s$, ahol az e gőznyomás a levegőben lévő vízgőz parciális nyomása, az e_s pedig a telítési gőznyomás, amely csak a hőmérséklettől függ. Gyakran használjuk a q specifikus légnedvességet, amely a tömegegységben lévő vízgőz mennyiségét adja [g/kg]-ban. Közvetve fejezik ki a légkörben lévő vízgőz mennyiségét azok a hőmérsékletek, amelyek a víz fázisváltozásaival kapcsolatosak. A T_d -vel jelölt harmatpont az a hőmérséklet, amelyen adott nyomáson a vízgőz telítési gőznyomását eléri és kondenzálódik (harmat keletkezik). A T_w nedves hőmérséklet az a legalacsonyabb hőmérséklet, amelyre a levegő adott nyomáson a víz elpárologtatása nyomán lehül.

Adott időjárási helyzetet az *időjárási térképeken* szokás ábrázolni, amelyek megjelenítik a különböző időjárási állapotjelzőket, a talajközeli ciklonokat és anticiklonokat, frontvonalakat stb. Az időjárás térképeken szereplő néhány fontosabb alapszimbólum:

○	derült, felhőtlen	▲	jégeső
◐	kissé felhős	*	hózállingózás, havazás
◑	közepesen fátyolfelhős	⋆	havas eső
◒	közepesen felhős	↗	hófúvás
◓	erősen fátyolfelhős	▽	zápor
◔	erősen felhős	▽	hózápor
●	borult	▽	zápor jégesővel
≡	ködfoltok	(R)	dörgés
≡	ködös	⌊	zivatar
•	szitálás, ónos szitálás	⌊	hózivatar
☁	ónos eső	⌊	zivatar jégesővel
•	eső	↘	szeles
△	fagyott eső	∨	zúzmara



1. ábra. Időjárás térkép részlete

Az időjárás térképek sok egyéb mellett megmutatják a légkör nyomás- és hőmérséklet eloszlását, és úgynevezett *szélzászlók* segítségével feltüntetik a szélirányt is. A zászló nyele a szélirányt jelzi, maga a zászló pedig rövid és hosszú vonalokból áll. Egy rövid vonal körülbelül 2,5 m/s, egy hosszú körülbelül 5 m/s sebességnek felel meg. Az 1. ábrán látható időjárás térképrészleten a folytonos vonalak izobárokat (azonos nyomású helyeket) jelölnek. A rájuk írt szám a nyomás értékét jelenti hektopascalban. Az ábrán Anglia fölött kissé nyugatra több középpontú **A** alacsony nyomású, koncentrikus izobárok körülvett képződmény, *ciklon* látható. A háromszögekkel a hideg, a félkörökkel a meleg, a háromszögek és a félkörök váltakozásával jelölt vastag vonalak pedig az okklúziós frontok. Az **M**-mel jelölt helyek a magasnyomású anticiklonok középpontjai.

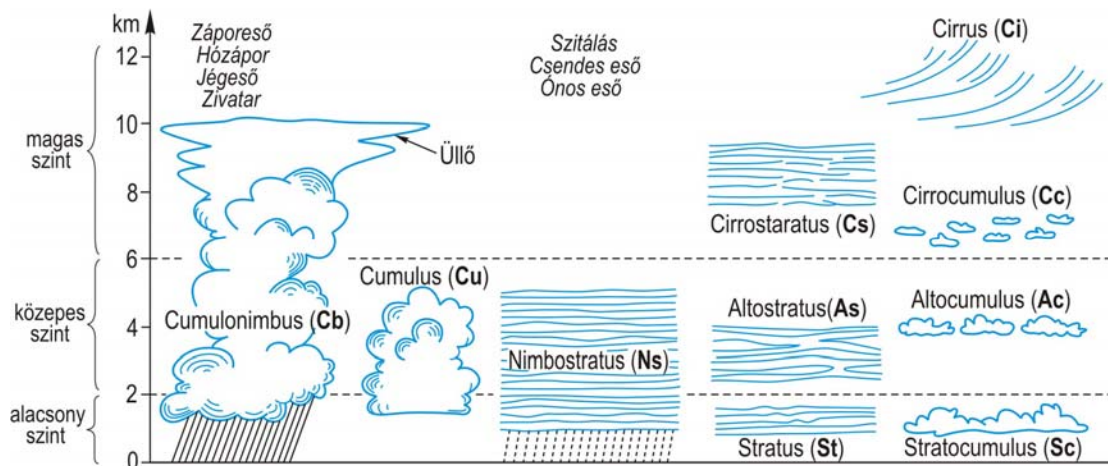
A felhők

A felhő a levegőben lévő vízgőz halmazállapot-változásának eredménye. Túltelítéskor a vízgőz cseppfolyós (kondenzáció) vagy szilárd (szublimáció) halmazállapotú vízzé alakul. A túltelítés párologással, döntően azonban a felszálló légtömegek lehűlése révén következik be. A lehűlésen kívül a felhőzet kialakulásához még a légkörben lebegő kondenzációs vagy szublimációs magokra is szükség van.

A felhőket magassági elhelyezkedésük és alakjuk szerint osztályozzuk. A magassági elhelyezkedés és az anyagi összetétel között szoros összefüggés van. A magasban lévő felhők (közel a tropopauzához) jégkristályokból, az alacsonyszintűek zömmel vízecspepekből állnak. A felhők alakja azoktól a fizikai folyamatoktól függ, amelyek létrehozták őket. Pl. lassú lehűlés rétegfelhőket képez, hirtelen gyors lehűlés gomolyfelhőket hoz létre.

A felhők alakjának, anyagának, magasságának együttes figyelembevételével a Meteorológiai Világszervezet elkészítette a felhők összesített rendszerezését. A nem-

zetközi felhőosztályozás tíz alaptípust (felhőfajt) különböztet meg. Az egyes felhőfajok kölcsönösen kizárják egymást, tehát egy adott felhő nem tartozhat egyszerre több fajhoz. A felhő neve latin eredetű szó, két betűs rövidítéssel. A magassági elhelyezkedés szerint beszélünk magas, közép és alacsonyszintű felhőkről (2. ábra).



2. ábra. A különböző felhőfajták magassági elhelyezkedése

A mérsékelt szélességeken a magasszintű felhők alapja 5-13 km között, a középszintű felhők alapja 2-7 km között, az alacsonyszintűeké 2 km alatt található.

Magasszintű felhők

	<p>Ci = Cirrus (pehelyfelhő). Finom, rostos, szálás szerkezetű, rendszerint különálló foltokból vagy keskeny csíkokból áll. Fehér, selymes fényű, saját árnyéka nincs.</p>
--	---

	<p>Cs = Cirrostratus (fátyolfelhő). Sima, fátýolszerű, átlátszó, fehéres színű felhő. Részben vagy teljesen beborítja az eget, esetenként halo-jelenséget okoz.</p>
--	--



Cc = Cirrocumulus (báránnyfelhő).
Vékony fehér foltokból álló lepelszerű felhő. A foltok árnyék nélküliek. A felhő elemei kicsinyek, fodorszerűek. Néha a fodrok összeolvadnak, néha elkülönülnek, de szabályos elrendeződést mutatnak. A legtöbb elem látószöge kisebb mint 1° .

Középszintű felhők:



Ac = Altocumulus (középszintű gomolyfelhő, lencsefelhő).

Fehér vagy szürke színű, amelyen általában árnyékolás is megfigyelhető. Lapos gomolyok, kerek lapok alkotják, az elemek néha különállnak, néha egybeolvadnak, esetleg bolyhosak. A különálló elemek szabályosan rendeződnek, a legtöbbjük látószöge 1° és 5° közé esik.



As = Altostratus (középszintű rétegfelhő).

Szürkés vagy kékes színű szálkás, barázdált vagy egyenletes lepel vagy réteg, amely teljesen vagy részben beborítja az eget. A felhő olyan vékony, hogy a Nap rajta elmosódottan keresztül látszik, mint egy homályos üvegen át. Az *As* nem okoz halo-jelenséget.

Alacsony szintű felhők:



Sc = Stratocumulus (réteges gomolyfelhő).

Szürke vagy fehéres színű folt vagy réteg, amely sötét kerek, gomolyos részekből mozaikszerűen tevődik össze. Szálkás, rostos része nincs. A gomolyos elemek összeolvadhatnak, néha elkülönülnek. A legkisebb, szabályosan rendezett, részek látószöge nagyobb mint 5° .



St = *Stratus* (rétegfelhő).

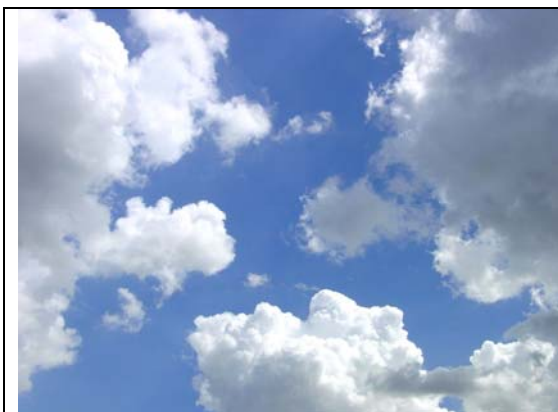
Általában egyenletes szürke réteg vagy ködfelhő. Belőle szemerkélő eső, hószállingózás lehetséges. Ha a Nap látható a felhőn keresztül; a körvonala felismerhető. A felhő néha szakadozott.

Függőleges felépítésű felhők:



Ns = *Nimbostratus* (réteges esőfelhő).

Szürke, vastag, egyenletes felhőréteg, gyakran sötét, belőle eső vagy hó hullik. Elég sűrű ahhoz, hogy a Napot teljesen elfedje. Alatta gyakran vannak alacsony egyenetlen felhők, amelyekkel néha egybeolvad.



Cu = *Cumulus* (gomolyfelhő).

Különálló, sűrű felhő, éles körvonalakkal. Függőleges kifejlődésű, növekedő dombok, kupolák, tornyok formájában. A felső része gyakran kelvirágra hasonlít. A felhő napsütötte része ragyogóan fehér, az alapja közelítőleg vízszintes és sötét. A felhő néha szakadozott.



Cb = *Cumulonimbus* (zivatarfelhő).

Hatalmas, sűrű gomolyos felhő. Erőteljes függőleges kiterjedésű, hegyhez vagy hatalmas toronyhoz hasonlít. A felső, *üllő* alakjában szétterülő része ritkábban sima, inkább rostos, szálkás jellegű, majdnem minden esetben lapított formájú. A felhő alapja alatt, amely gyakran nagyon sötét, felhőfoszlányok vannak, ezekkel néha egybeolvad. Rendszerint csapadéksáv kíséri.

A felsorolt 10 alaptípusnak sok különböző altípusát ismerjük, ezekkel azonban itt nem foglalkozunk.

A felhők vízszintes kiterjedése a keletkezés körülményeitől függ. A frontális *Ns* 10^5 - 10^6 km² nagyságú területet is befedhet. A konvektív eredetű felhők kisebb területet foglalnak el (frontális *Cb* kb. 10^4 km² területet is beboríthat). A *St* és a *Sc* felhők leggyakrabban a korreggeli órákban képződnek, mert ekkor a legerősebb a talaj és a felette elterülő levegő sugárzás okozta lehülése. A nappalra megerősödő szél hatására ezek a felhők rendszerint feloszlanak.

A szél

A levegő földfelszínhez viszonyított áramlását *szélnek* nevezzük. A szél vektormennyiség, ezért a nagyságán kívül az iránya is jellemzi. Az irányát vagy azzal az égtájjal adjuk meg, amely irányból fúj, vagy az É-i iránytól mért - a geodéziából ismert - azimut értékkel.

Amennyiben a szélesebb mészeres megfigyelésére nincs lehetőség, akkor a szél hatása alapján következtethetünk a szélesebbre. A szél hatása alapján *Beaufort* (1805) által kidolgozott skála eredetileg a szélcsenden kívül 12 fokozatot különböztetett meg, amelyet később kiegészítettek 17 fokozatra, és külön tavakra, tengerekre, és a szárazföldi területekre is tartalmazza a hatásokat, illetve jelenségeket. Az *1. táblázatban* példaként a Beaufort-skála néhány fontosabb fokozatának megfelelő hatás leírása látható.

1. táblázat. A Beaufort-féle szélerősségi skála

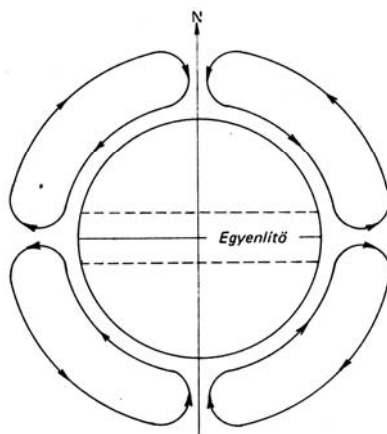
Ikon	Megnevezés	m/s	km/h	Beaufort	Hatás
●	Teljes szélcsend	< 1	< 3,6	0	A füst felfelé száll.
↓	Gyenge	1,1 - 3	3 - 11	1 - 2	A fák levelei gyengén rezegnek, a füst ingadozik.
↯	Mérsékelt	3,1 - 7	12 - 25	3 - 4	A fák vékony gallyai mozognak.
⏏	Élénk	7,1 - 11	26 - 40	5	A fák kisebb ágait mozgatja, zúg. A zászló majdnem vízszintesen lobog.
⏏	Erős	11,1 - 16	41 - 59	6 - 7	A nagyobb ágak mozognak, egyes levelek elszakadnak. A zászló vízszintesen lobog. (Balatonon I. fokozat)
⏏	Viharos	16,1 - 20	60 - 72	8 - 9	Az erősebb fák törzse is hajladozik, erősebb ágak is letörnek. (Balatonon II. fok)
⏏	Szélvihar	20,1 - 24	73 - 87	10 - 11	Nagyobb fákat tör. A tetőszerkezeteket felbontja.
⏏	Erősen viharos	24,1 - 32	88 - 119	12	A szél erős pusztítást végez.

Az általános légkörzés

A Nap sugárzása, a földtengely ferdesége és a Föld forgása bonyolult viszonyokat teremt, és a légkörben az egyenetlen felmelegedés és a forgás hatására áramlások indulnak.

Ha a Nap nem melegítené a légkört, akkor a levegő hamarosan felvinné az adott helyen a forgásnak megfelelő sebességet, azaz a Földhöz képest nem jönnének létre áramlások.

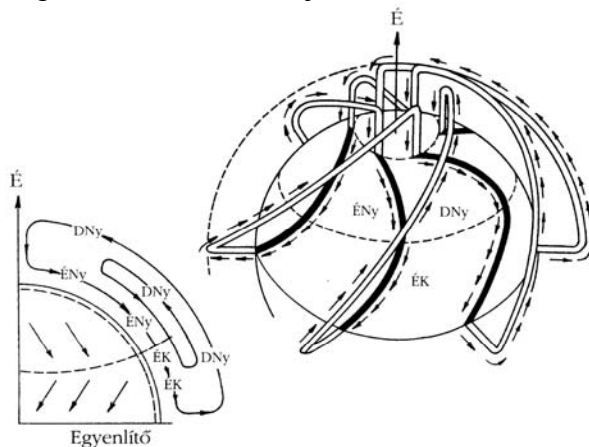
Amennyiben – az ókori elképzelések szerint – a képzeletben egy helyben álló, nem forgó Földet a Nap az Egyenlítő síkjában naponta körbejárná, akkor a sugárzás a levegőt az Egyenlítőtől a sarkokig egyenetlenül melegítené fel. Az Egyenlítő mentén felmelegedő levegő felszállna és a magasban a sarkok felé áramlana, ahol kihűlve lefelé mozogna és a földfelszínen visszaáramlana az egyenlítő felé. Mindkét féltekén kialakulna tehát egy-egy légkörczés, ami a hőmérséklet kiegyenlítését szolgálná (3. ábra).



3. ábra. Egycellás modell

A valóságban a két hatás együtt működik, megtévezve azzal, hogy a Föld tengelye nem merőleges az ekliptika síkjára. Ez utóbbi hatás okozza az évszakok változását. Az általános légkörczés vizsgálatakor azonban eltekinthetünk tőle.

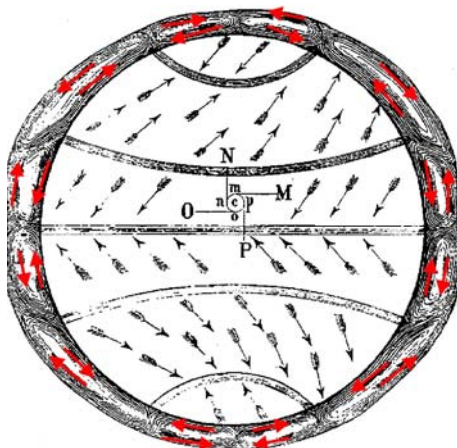
Amikor az Egyenlítő felől a magasban a meleg levegő észak felé áramlik, akkor a magasabb szélességeken nem tudja azonnal felvenni az adott szélességi körön a Föld forgásából adódó sebességet, hanem a tehetetlensége miatt megőrzi az egyenlítői mozgásnak megfelelő sebességét. Ez azt eredményezi, hogy az Egyenlítő felől érkező levegő a Földhöz képest kelet felé mozog, vagyis ott nyugati szél fúj. Hasonló okból az Egyenlítő környékén a visszaáramló hideg levegő, mintegy lemaradva a Föld forgásától, keleties szeleket eredményez. Ezt az elképzelést tükrözi a 4. ábra, amely a légkörczést Hadley elképzelése szerint mutatja az északi féltekére vonatkozóan.



4. ábra. Hadley egycellás modellje

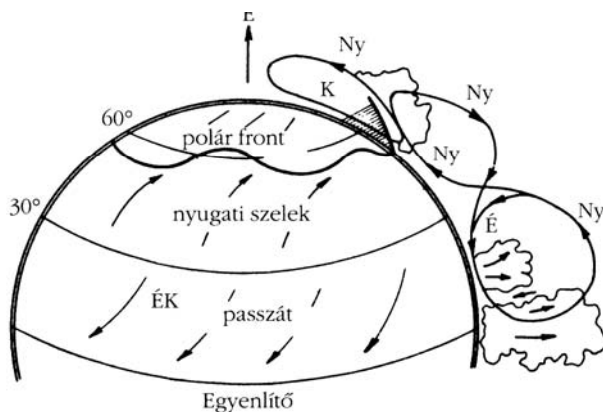
Hadley modellje volt az első, amely már reális elemeket tartalmazott az általános légköri mozgásról, és az egyenletlen melegedés mellett a Föld forgásának hatását is figyelembe vette. A tapasztalatok azonban mást mutattak. A hajósok már az újkor kezdetén feltérképezték a tengereken fújó szelek irányát, és a *Hadley-modell* csak részben tükrözte a tapasztalatokat.

Ferrell a földfelszín mentén uralkodó átlagos szélirányokat megfigyelve megállapította, hogy az egycellás modell nem alkalmas az általános légköri mozgás leírására. Az 5. ábrán látható térképe alapján mind az északi, mind a déli féltekén nagyjából a Rák-térítőig, illetve a Baktérítőig az Egyenlítő felé fújó keleties, onnan a sarkkörig a sarkkör felé fújó nyugati, majd a sarkok felől a sarkkörökig ismét keleti szél az uralkodó.



5. ábra. Ferrell általános légköri mozgási modellje

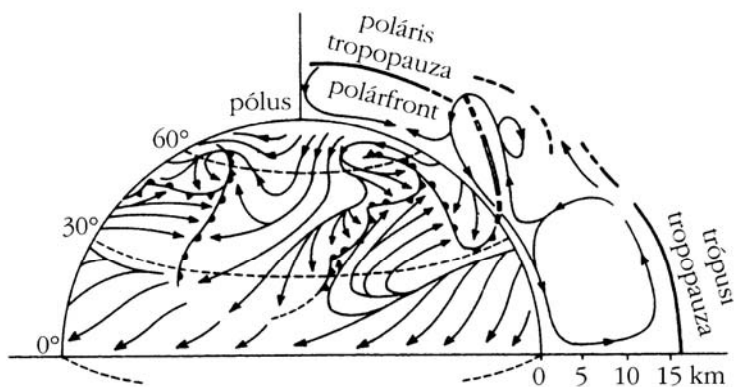
A valóságban az Egyenlítő felől a magasban a sarkok felé mozgó levegő olyan gyorsan hűl, hogy a tapasztalat szerint már a tértörvények mentén a talajra kényszerül. A leáramlás során kettévál, egyik része keleties irányú passzát szelek formájában az Egyenlítő felé visszafordul, másik része a földfelszínen tovább folytatja útját a sarkok felé nyugati szeleket okozva. A szélirányok mindkét esetben a Föld forgása (a Coriolis-erő) miatt eltérnek az észak-déli iránytól. Ennek megfelelően *Rossby* szerint az általános légköri mozgás leírásához három cella szükséges. *Rossby* megállapítása szerint tovább bonyolítja a képet, hogy a 40° és a 60° szélességek tájékán létrejön egy hullámzó, ún. polárfront, amely az egész Földet körbeérő sarki hideg és az egyenlítői meleg levegőt elválasztja (6. ábra).



6. ábra. Rossby háromcellás modellje a polárfronttal

A *Rossby* háromcellás modellje alapján mára kifinomodott és elfogadott általános légköri lényegéről a 7. ábra ad egyszerű szemléletes képet. Ez a modell az alacsonyabb szélességek övezetében elfogadja a *Hadley*-cirkuláció domináns szerepét, a közepes szélességek övezetében viszont a szinoptikus skálájú (nagy területekre vonatkozó) hullámokat és örvényeket állítja előtérbe. A valóságban a cellák, elsősorban az Egyenlítőtől távolabb eső kettő, nem zártak. A hullámzó polárfront kitüremlései meg-növekedhetnek és a frontról lefűződve zárt örvények, ciklonok és anticiklonok formájában, leszakadhatnak.

A ciklonok ott keletkeznek, ahol a meleg levegő észak felé nyúlik. A meleg levegőben a nyomás alacsonyabb, így a ciklonok alacsony nyomású képződmények, amelyekben a dél felé nyúló hideg levegő gyorsabban mozog mint a meleg. A frontvonalról véletlenszerűen leszakadó ciklonok azután nyugatról keletre haladnak, forgásirányuk az északi féltekén az óramutató járásával ellentétes, a déli féltekén azonos irányú. Az áramlások három dimenzióban történnek, így pl. a mérsékeltövi örvények nyugati oldalán dél felé tartó hideg levegő süllyedő és lent szétterülő mozgását; másrészt az örvények keleti oldalán az észak felé tartó meleg levegő emelkedő és fent szétterülő mozgását is figyelembe kell venni.

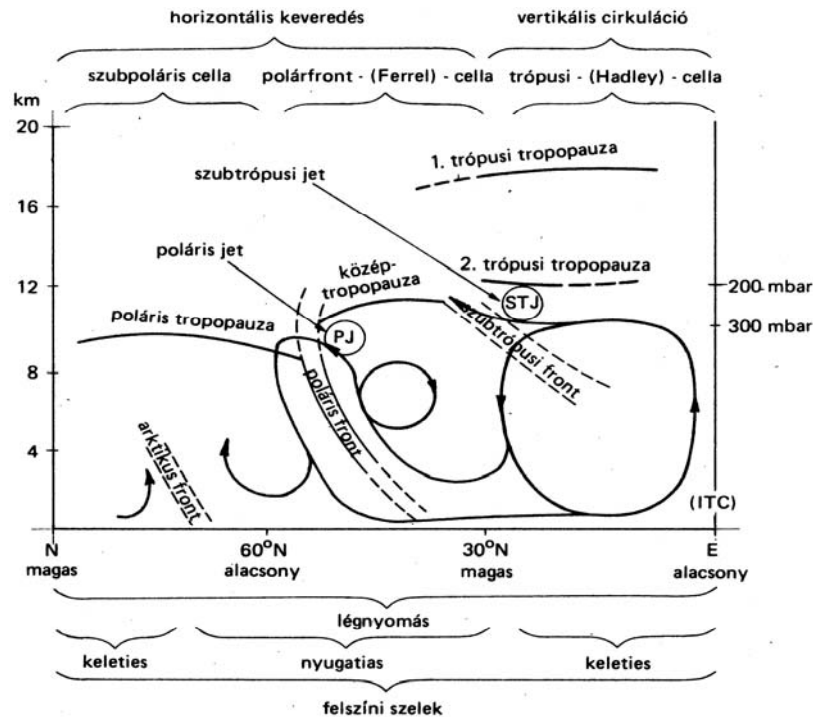


7. ábra. Az általános légköri lényeg ma elfogadott modellje

A 8. ábrán a globális cellák meridián irányú metszete látható, amely összesített képet ad az eddigi ismeretekről. Az ábra alapján két fő frontális zóna, a polárfront és a szubtrópusi front a légkört három cellára osztja. A szubtrópusi front és az Egyenlítő (szigorúan véve az ITC = trópusi összeáramlási zóna) között foglal helyet a *Hadley*-cella, amelyet *trópusi cellának* is nevezhetünk. A két fő frontális zóna által közrefogott öv a *polárfront cella*, melyet néha *Ferrel-cellának* is neveznek, amelyben a nagyméretű horizontális hullámok és örvények játszanak döntő szerepet. Végül a polárfront és a pólus között helyezkedik el a *szubpolár is cella*, amelyen belül hozódik az *arktikus front*. A frontálzónák és a tropopauzák olyan tartományokat fognak közre, amelyekben a levegő az adott földfelszíni övezet sajátosságainak megfelelően, bizonyos jellemző egyensúlyi állapotokat (tulajdonságokat) vesz fel és azokat hosszabb időn át megtartja. Ilyen *levegőfajták* pl:

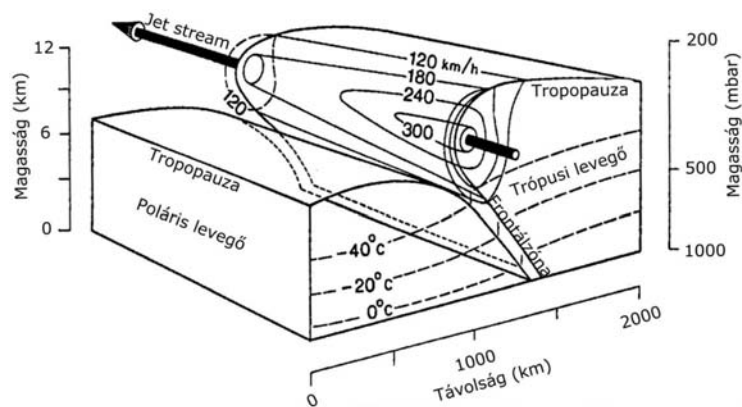
- trópusi alsó-troposzférikus levegő (TL): a passzát-öv levegője a másodlagos trópusi troposzféra alatt,
- mérsékeltövi troposzférikus levegő (ML): a polárfront és a szubtrópusi front közötti levegő a mérsékeltövi tropopauza alatt;
- poláris troposzférikus levegő (PL): az arktikus és szubarktikus övek hideg levegője, a polárfront alatt,

- arktikus levegő (AL): a poláris troposzférikus levegő (PL) alfaja, amely az arktikus front alatt alakul ki,
- trópusi felsőtroposzférikus levegő (TFL): a trópusi öv levegője a két trópusi tropopauza között.



8. ábra. Az általános légkörzés celláinak modellje

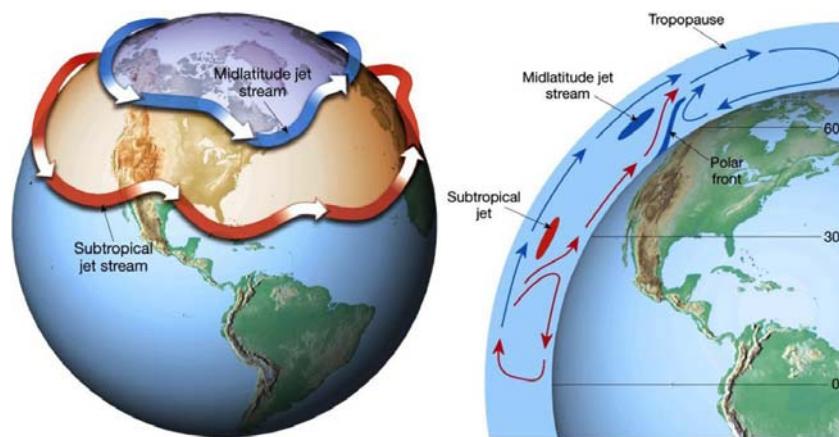
Rendkívül fontos képződmények a 8. ábrán látható *jet stream*-ek (futó áramok). Ezek hosszú, keskeny, nagy sebességű légáramlások, amelyek keleti irányban száguldanak körük a sztratoszférában vagy a troposféra felső rétegében. Erős függőleges irányú nyíróerőt fejtenek ki, és nagyrészt ezek a repülőgépekre veszélyes légörvények okozói. Sebességük eléri akár az 500 km/óra értéket az áramlás több ezer km hosszú központi sávjában, ám az áramlás sebessége ugrásszerűen csökken mind oldal-, mind függőleges irányban, úgyhogy a nagy sebességek csak a 10 és 50 km közti magasságban lévő igen keskeny sávokban tapasztalhatók, amelyek általában a tropopauza törésénél, azaz ugrásszerű magasságváltozásainál húzódnak (9. ábra).



9. ábra. A jet stream modellje

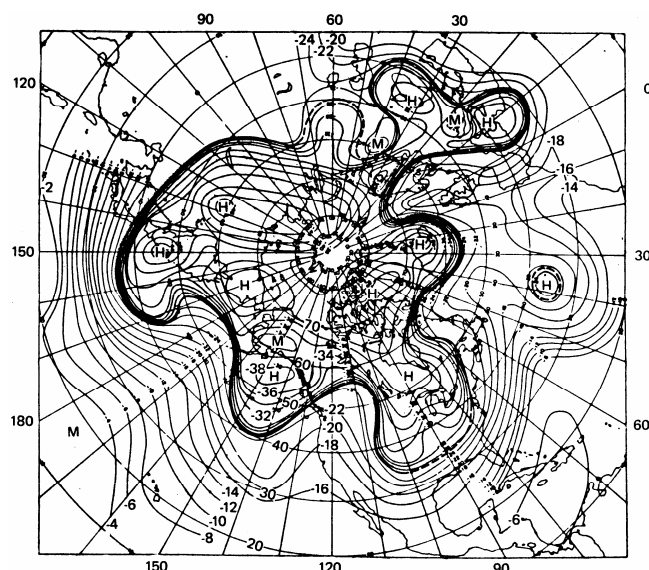
A szubtrópusi jet (STJ) éppen ott helyezkedik el, ahol a Hadley-cella, fokozatosan zonális irányba forduló felső ága a legnagyobb nyugatias sebességeket éri el.

A poláris jet (PJ) létrejöttét a 7. ábra segítségével érthetjük meg. Látható, hogy a 30°-os szélességi kör tájékán a Hadley-cella leszálló ága a felszín közelében kettéválk: a levegő egy része visszaáramlik a passzátokkal az Egyenlítő felé, más része viszont észak felé indul. Mivel ez az északra tartó levegő melegebb a polárfrontnál elterülő poláris levegőnél, ezért a polárfront mentén felsiklásra kényszerül. A trópusi eredetű levegő ilyen módon fokozatosan 8-10 km magasságig emelkedve átlagosan a 60°-os szélességi körig, de esetenként ennél még sokkal északabbra eljut. Az impulzusnyomaték megmaradásának törvénye természetesen erre az áramlásra is érvényes; tehát ez a levegő is növekvő nyugatias sebességre tesz szert és egyre inkább befordul a zonális irányba. A polárfront mellett mindig van PJ, de nem minden PJ mellett van polárfront, mivel a poláris jet időnként ágakra szakad.



10. ábra. A poláris és a szubtrópusi jet stream meanderező (hullámzó) mozgása

A jet streamek a 10. ábrán látható módon meanderező (hullámzó) sávokban övezik a Földet, és az évszakoknak megfelelően változtatják helyzetüket és sebességüket. Télen az Egyenlítőhöz közelebb helyezkednek el, és sebességük nagyobb, mint nyáron. Sokszor két, néha három jet stream-rendszer is kialakul mindkét féltekén.

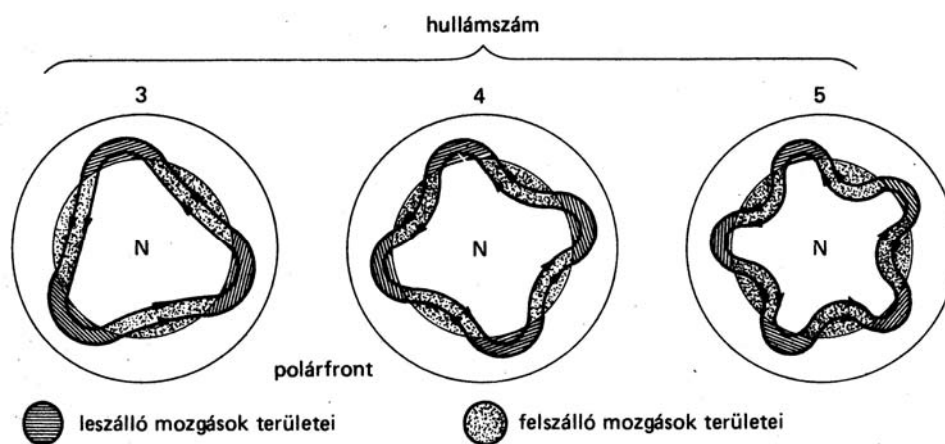


11. ábra. A poláris front alakját jellemző izotermák eloszlása 500 mb magasságban

A hullámszám (meanderezés, kígyózás) feltűnő jellegzetessége a polárfrontnak, illetve a jet streamnek. Jól érzékelteti ezt a 11. ábrán látható példa, amely 500 mb magasságban mutatja az izotermák eloszlását 1951 februárjában.

A jet stream tengelyében kialakuló nagy hullámhosszú szimmetrikus hullámokat, amelyek elválasztják a hideg sarkvidéki, ill. a meleg trópusi légtömegeket *Rossby-hullámoknak* hívjuk.

A *Rossby-hullámok* tehát az Egyenlítő felé áramló sarkvidéki és a sarkok felé haladó trópusi levegő mozgása következtében jönnek létre. A trópusi levegő hőt szállít a sarkok felé, míg az Egyenlítő felé mozgó poláris levegő hőt vesz fel. Ha a hullám amplitúdója nagyon megnő, hullámhurkokba záródó hideg, ill. meleg légtömegek szakadhatnak le a futóáramlás tengelyéről. Ezekből alacsony, ill. magas légnyomású zárt cirkulációs cellák (ciklonok és anticiklonok) alakulnak ki, melyek a közepes szélességek éghajlatának alakításában döntő szerepet játszanak.

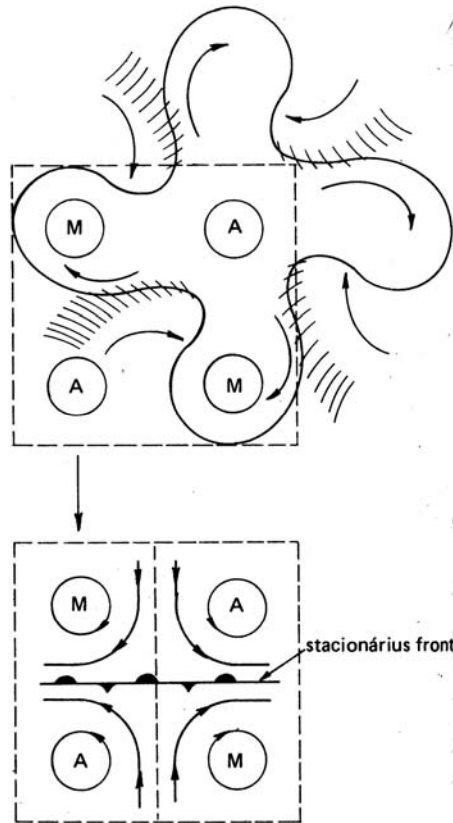


12. ábra. A Rossby-hullámok hullámszáma

A *Rossby-hullámok hullámszáma* a hőmérsékletkontraszt által befolyásolt termikus cirkuláció sebességének, a forgási szögsebességnek, és más egyéb fizikai tulajdonságok függvénye. Száma átlagosan 3 és 6 között van de igen ritkán akár 8 is lehet. Stabil képződmények, az egész hullámrendszer többé-kevésbé állandó sebességgel, rendszerint K-felé fordul (progresszív mozgás), de állhatnak egy helyben a hullámok (stacionárius) sőt ritkán tapasztalható retrográd körbefordulás is.

Ciklonok kialakulása

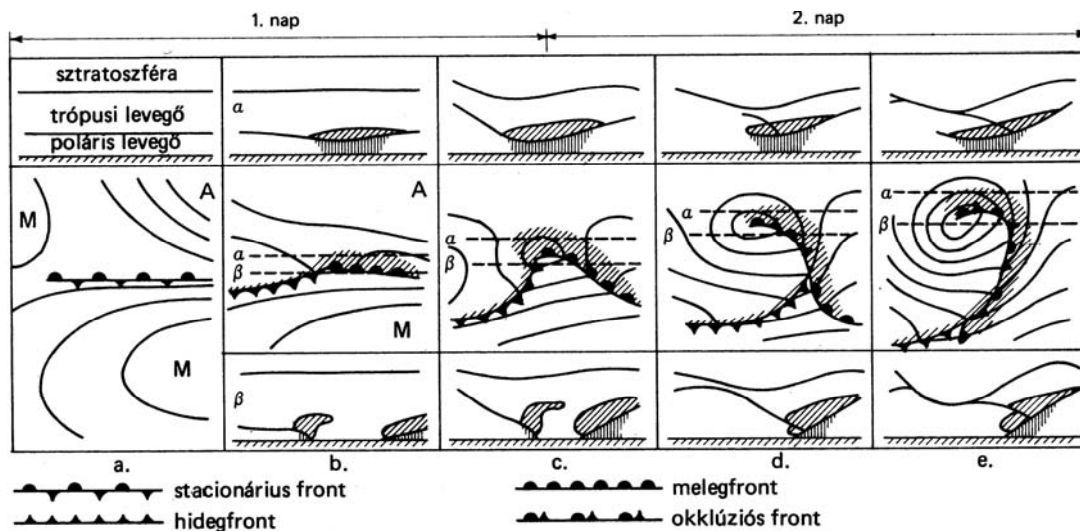
A pólust körülfutó polárfront két oldalán magas nyomású hideg és alacsony nyomású meleg levegő van. A meanderező bárius izovonalak alapján az alacsony szélességű oldalról magasnyomású gerincek nyúlnak be a pólus felé, más helyeken pedig alacsony nyomású teknők nyúlnak ki az alacsony szélességek felé. Így a Rossby-hullámoknak megfelelően váltakozva hideg és meleg levegőnyelvek nyúlnak át az ellentétes területre. E levegőnyelvek az Északi féltekén mind jobbra kanyarodnak, jobb oldalukon konvergencia (összeáramlás, légnyomás növekedés), bal oldalukon pedig divergencia (szétáramlás, csökkenő nyomás) alakul ki és ciklonális zavarok keletkeznek. A zavarok először csak kis "fodrozódások", majd egyre növekedő amplitúdójú hullámok lesznek.



13. ábra. A Rossby-hullámok mentén kialakuló teknők és gerincek

A mérsékelt övi ciklonok fejlődési állapotait a 14. ábrán követhetjük nyomon. Amint a polárfront kezdeti hulláma kialakul (14/b. ábra), a hullám "tetőpontjánál" esik a légnyomás. Az így keletkező depresszió az említett "tetőpont" körül ciklonális irányú (balforgású) cirkuláció kialakulására vezet. Ennek következtében a "tetőpont" mögötti szakaszon a hideg levegő nyomul előre a meleg levegő rovására, a "tetőpont" előtti szakaszon pedig megfordítva (14/c. ábra). Ez annyit jelent, hogy a hullám "tetőpontja" mögött un. "hidegfront", előtte pedig un. "melegfront" alakul ki. Eközben maga a polárfronton keletkezett hullám is áthelyeződik, követve a magasabb légrétegekben uralkodó általános áramlás irányát. A hullám ciklon a keletkezésétől számítva kb. 1 nap múlva éri el a 14/c. ábrán látható állapotát. Miközben a hullám amplitúdója növekszik, a képződmény középpontja körül a légnyomás süllyed és a ciklonális cirkuláció erősödik. A képsorozatból látható, hogy a hátul levő hidegfront gyorsabban halad, mint a melegszelet előtt húzódó melegfront, így azt fokozatosan kezdi utolérni. A 14/d. ábrán azt a stádiumot látjuk, amikor a ciklon belső övezetében a hidegfront már utolérte a melegfrontot.

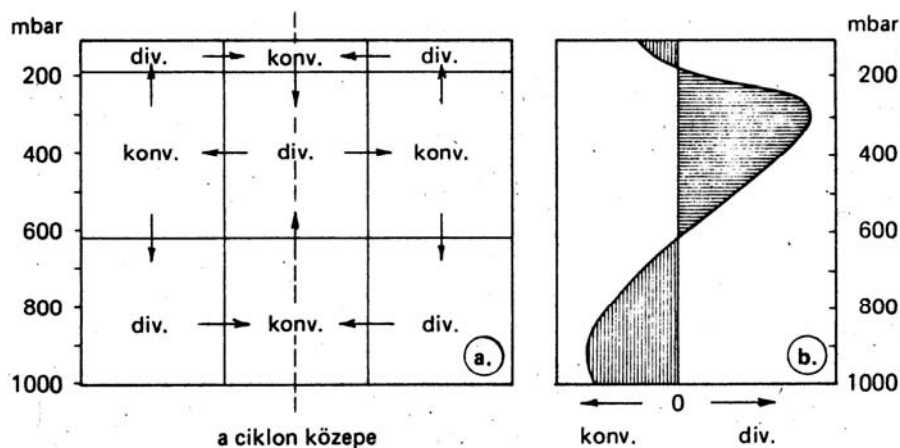
A ciklon keletkezésének kezdetétől számított 2 nap táján alakul ki a 14/e. ábrán látható állapot, amelyben a két front teljesen összezáródik. Ez azt jelenti, hogy a melegfront előtti és a hidegfront utáni levegő a felszínről már teljesen kiszorítja a meleg szelet levegőjét. Szaknyelven ezt úgy mondhatjuk, hogy a meleg szelet *okkludálódott* (kiszorult); a hideg- és melegfront ilyenfajta egyesülését pedig *okkluziós frontnak* nevezzük.



14. ábra. Mérsékeltövi ciklon fő fejlődési állapotai

A ciklonok két fő jellemzője (alacsony légnyomás és spirális befelé irányuló áramlás) természetesen csak a légkör bizonyos rétegére vonatkozhat. Ha pl, az alsó troposzférában egy alacsony nyomású képződmény helyezkedik el, amelybe a levegő spirálisan minden oldalról beáramlik; szükség van egy olyan kompenzációs áramlási rendszerre, amely gondoskodik a beáramló levegő eltávolításáról. Ez a kompenzáció úgy valósulhat meg, ha az alul beáramló levegő feláramlik és a felső troposzférában (egy környezeténél magasabb nyomású képződményt létrehozva) anticiklonálisan szétáramlik. A kompenzáció azonban lehet bonyolultabb is.

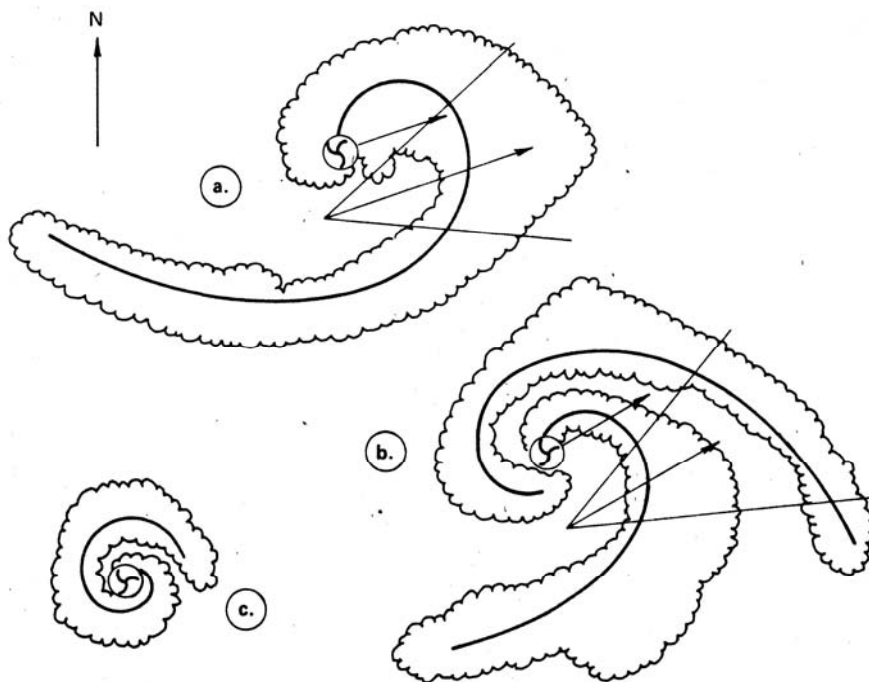
Előfordul pl, hogy a szétáramlási réteg fölött ismét egy összeáramlási rendszer alakul ki stb. Mindezt a 15. ábra mutatja be. Az ábra bal oldalán a ciklonális cirkulációs rendszer sematikus modelljének függőleges keresztmetszetét, a jobb oldali részletrajzon pedig a konvergens és divergens tartományok ehhez tartozó elhelyezkedését látjuk.



15. ábra. Mérsékelt övi ciklon kompenzációs áramlási rendszerének vázlatja

Az előbbiekből alapján érthető, hogy ha egy ciklon spirális áramlási rendszeréről beszélünk, akkor egyértelműen csakis egy meghatározott réteg áramlási rendszerét vehetjük figyelembe. A döntő általában a felhőzet zömének tartománya, mert a spirális szerkezetet a felhők teszik láthatóvá. A műhold felvételeken gyakran látható, hogy azokon a részeken, ahol magas szintű felhőzet nincs, a közepes- és alacsony szintű fel-

hők spirális karjai világosan jelzik a beáramlási réteg ciklonális, cirkulációját. A magas szintű felhőzet ezeken a képeken aszimmetrikus csóvaként jelenik meg, és ez a csóva természetesen részben elfedi az előbb említett spirális karokat. De ennek ellenére a ciklonok spirális szerkezete szinte minden esetben nagyon jól felismerhető. Ebben döntő szerepet játszik az a tény, hogy a felhőzet zöme a konvergens tartományban alakul ki, hisz a feláramlásokat legtöbbször éppen a konvergencia idézi elő. A szétáramlás felső (divergencia) tartományában inkább a leszálló és felhősízelő mozgások jellemzők.

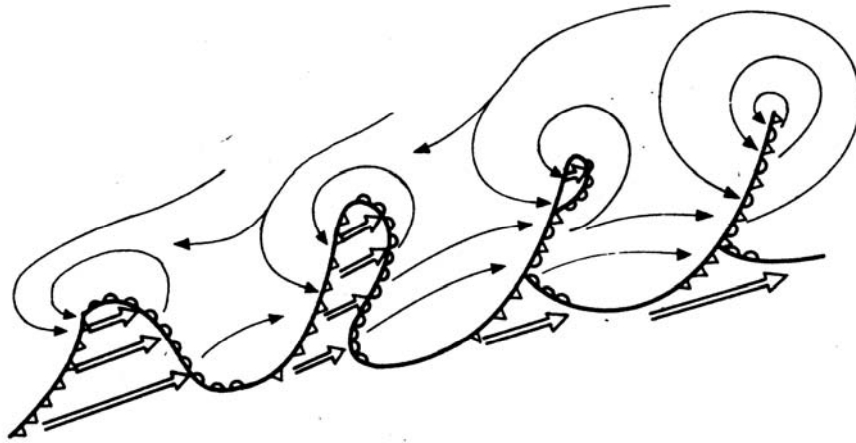


16. ábra. Ciklonális felhőkarok alakja gyors (a, b) és lassú (c) vándorlás esetén

A felhőspirálok alakját a ciklon haladó mozgása némiképp módosítja. Ezen az alapon következtetni lehet a ciklonok mozgási sebességére. A döntő kritérium a spirális karok aszimmetriájának mértéke. Ha a felhőkarok a 16. ábra a) részletrajzán látható hiperbolikus spirál alakot, vagy a b) részletrajz szerinti logaritmikusspirál alakot mutatják, akkor kb. 30-40 km/óra sebességgel mozgó ciklonhoz tartoznak. Ha viszont a felhőzet a sokkal szimmetrikusabb archimédeszi spirálhoz hasonló (c részletrajz), akkor valószínű, hogy a ciklon vonulási sebessége a 20 km/órát sem éri el. Az első két esetben a mozgás valószínű irányát nyilak jelzik. A harmadik esetben a mozgás iránya teljesen bizonytalan, ezért nincs is jelezve.

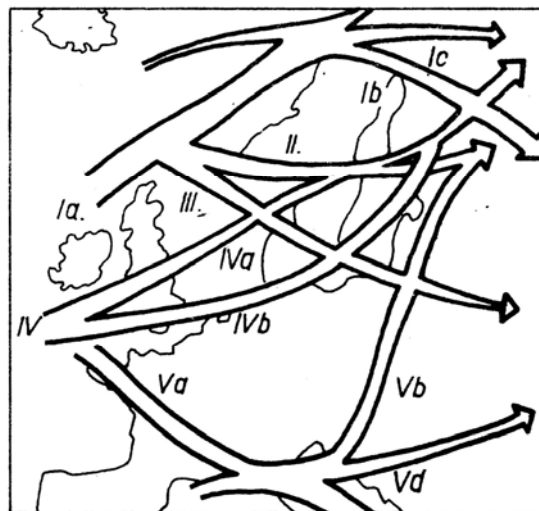
A ciklonok ÉK, az anticiklonok DK irányban mozognak. 30° és 60°-nál torlódhatnak (30°-nál alacsony nyomású 60°-nál magas nyomású öv alakul ki).

A főfrontokon ritka az egyedülálló hullám. Rendszerint egyik örvénylés a másikat követi. A ciklonok 14. ábrán bemutatott időbeli fejlődési állapotai ugyanazon főfront mentén térben egymás mellett megtalálhatók. Egy főfronton rendszerint négy különböző fejlettségű ciklont találunk, a főfronton ún. ciklonsorozat alakul ki. Az egyes ciklonok között előrenyomuló hideg levegőben magas nyomású területek, anticiklonok jönnek létre. A 17. ábrán egy négytagú ciklonsorozat látható. A meleg levegő áramlási irányát kettős, a hidegét normál nyíl mutatja. Ilyen esetben fordul elő, ha a ciklonsorozat első tagja valamelyik hétévégen rossz időt okoz, akkor több hétévégen keresztül számíthatunk ennek ismétlődésére.



17. ábra. Ciklonsorozat mozgása

Ciklonok vonulási útvonalára bizonyos szabályosság jellemző, pl. Magyarország időjárása szempontjából fontos, jelentős csapadékot hozó mediterrán ciklonok a 18. ábrán látható Vb jelű pályán mozognak.



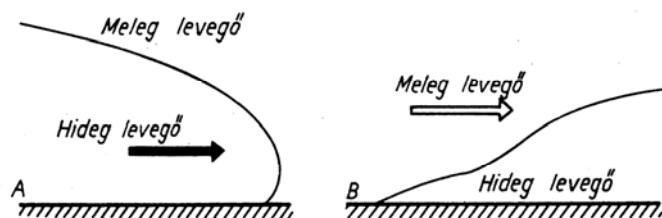
18. ábra. A Van Bebber-féle ciklonpályák Európa területén

Időjárási frontok

Időjárási fronton tágabb értelemben két különböző tulajdonságú levegőfajta átmeneti zónáját értjük, szűkebb értelemben a front kifejezést az átmeneti zóna földfelszíni sávjára vonatkoztatjuk. A front vízszintes irányban legfeljebb néhány tíz km széles, a függőleges kiterjedése néhányszor tíz vagy száz m.

A két légtömeget elválasztó felület a talajjal szöveget zár be. Ezt a szöveget a frontfelület hajlásszögének nevezzük. A közepes földrajzi szélességeken a frontok hajlásszöge igen kicsi, melegfrontok esetében $0.2^\circ - 0.5^\circ$, hidegfrontok esetében $0.5^\circ - 1.5^\circ$ nagyságrendű.

A front két oldalán különböző tulajdonságú légtömegek helyezkednek el. Az egyes tulajdonságok a frontfelület mentén ugrásszerű változást (növekedést vagy csökkenést) szenvednek. A frontfelületen többek közt a hőmérséklet értéke is ugrásszerűen megváltozik. A magasabb hőmérsékletű levegőt meleg, az alacsonyabb hőmérsékletűt hideg légtömeknek nevezzük. A hideg és a meleg légtömeg minden esetben úgy helyezkedik el, hogy a meleg levegő fölül, az ék alakú hideg levegő alul található (19. ábra).



19. ábra. Hideg és melegfront alakja

A légnyomás a front két oldalán azonos érték, de a nyomásváltozás iránya, a nyomási gradiens eltérő. A front mentén az izobárok törést szenvednek. Ez fordítva is igaz, ha a légnyomási térképen az izobárok "V" alakú elrendeződést mutatnak, ott front helyezkedik el. A nyomási gradiens megváltozása a szél megváltozását vonja maga után. A frontok tehát egyben szélfordulási vonalak is.

Az általános légkörzésben betöltött szerepük szerint megkülönböztetünk:

- éghajlati frontokat,
- időjárási frontokat.

Különbséget teszünk a frontok között a két oldalon elhelyezkedő levegő mozgási iránya, valamint a magasságuk szerint. A kiterjedés szerint beszélhetünk:

- troposzférikus,
- rriásod lagos (föld közeli),
- felső frontokról.

A troposzférikus front egészen a tropopauzáig terjed, a másodlagos front esetében a választófelület csak az alsó 1-2 km-ig követhető nyomon, a felső front viszont a talaj közelében nem észlelhető választófelület.

A front mentén elhelyezkedő levegő mozgási iránya szerint lehet:

- melegfront,
- hirdegfront,
- stacionárius front,
- okkluziós front.

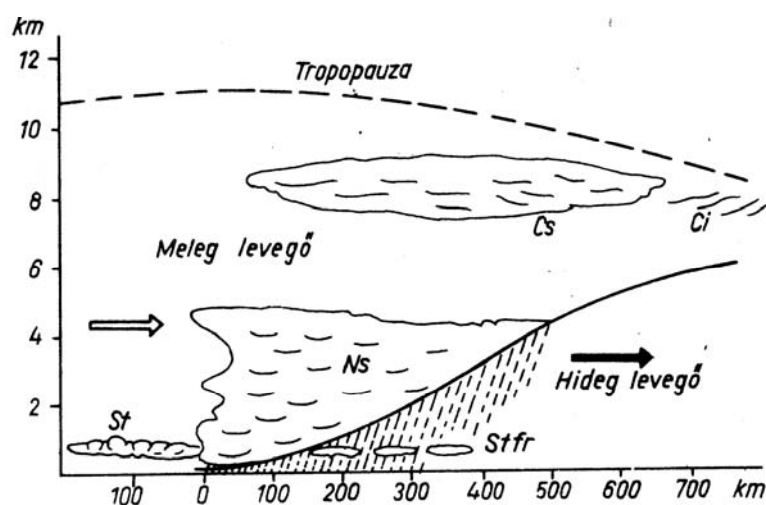
A melegfront a hideg, a hidegfront a meleg levegő irányába mozog. A stacionárius, vagy veszteglő frontra legfeljebb a lassú mozgás jellemző. Az okkluziós front hideg és melegfront találkozásakor alakul ki.

Az időjárás a helyi tényezőkön kívül a hely fölött elhelyezkedő légtömegtől függ. Egy adott hely fölött két légtömeg kicserélődése, vagyis a választófelület (front) áthaladása, időjárási szempontból jelentős esemény.

Melegfront

A hideg levegő irányában áthelyezkedő frontot melegfrontnak nevezzük. A meleg levegő áramlási sebessége nagyobb, ezért a meleg levegő az előtte elhelyezkedő hideg levegőre felsiklik. A melegfrontra a kicsi hajlásszög ($0.2^\circ - 0.5^\circ$) jellemző. A talajsúrlódás miatt a front a talajon lemarad, ezért a frontfelület kissé behorpad (19. ábra). A felsiklás során a levegő adiabatikusan lehül, felhőképződés indul meg. A melegfront felhőzete a front előtt alakul ki. A feláramlás sebessége kicsi, ezért a jellegzetes felhő réteges szerkezetű. A legelső Ci, Cs felhők 800-1000 km-rel a front előtt jelennek meg. A Cs réteg egészen a frontvonalig elnyúlik. Mintegy 400 km-rel a front előtt As, majd Ns felhők képződnek. A felhőzet a frontig tart, de néha mögötte is vannak St felhők. Az As, Ns felhőkből csapadék hullhat, így a csapadéksáv szélessége 2-400 km is lehet. A csapadék csendes eső vagy havazás. A front előtt gyakran képződik köd. Egy adott helyen a melegfront közeledtével légnyomáscsökkenést tapasztalunk. Ennek oka, hogy a hely fölötti légoszlopot egyre nagyobb százalékban meleg (könnyebb) levegő tölti ki.

A front áthaladása után a nyomáscsökkenés megszűnik. A hőmérséklet a front áthaladásakor ugrásszerűen megnő. A látástávolság a front után csökken, de gyakran a csapadék vagy a köd miatt már a front előtt is romlik. A szél a front átvonulásakor minden esetben jobbra fordul. A front függőleges metszete a felhőrendszerével és a csapadéksávjával a 20. ábrán látható.



20. ábra. Melegfront függőleges metszete

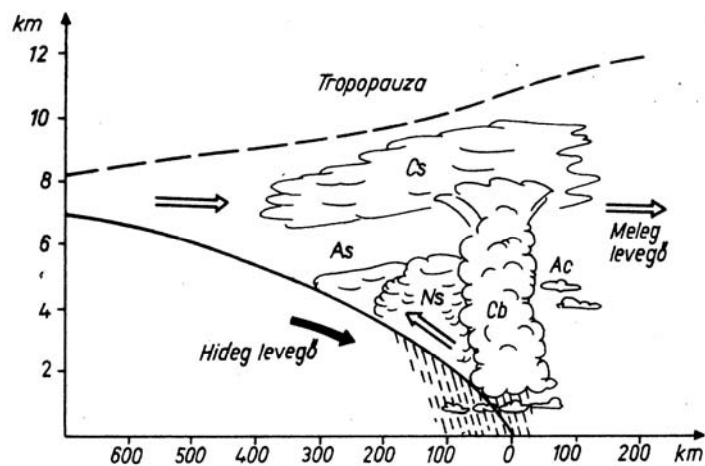
Hidegfront

A meleg levegő irányába áthelyeződő frontot hidegfrontnak nevezzük. A hideg levegő ék alakban a meleg levegő alá nyomul és azt felemelkedésre kényszeríti. A hidegfront hajlásszöge a melegfronténál valamivel nagyobb ($0.5^\circ - 1.5^\circ$). A súrlódás hatása miatt a front a talajon lemarad, így alakul ki a hidegfront 19. ábrán látható jellegzetes profilja.

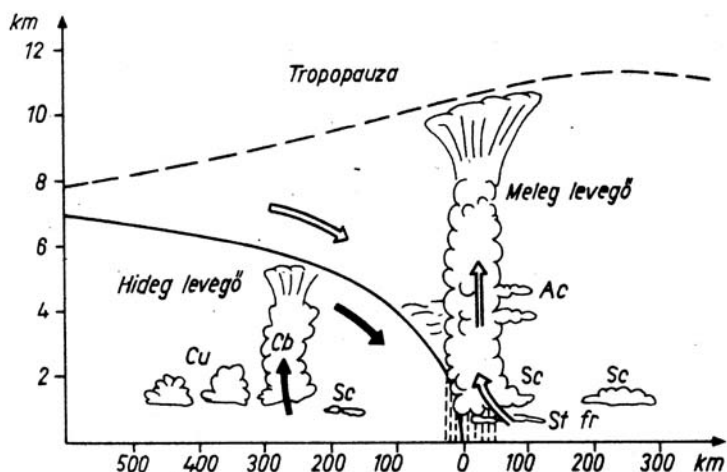
A légnyomás egy adott helyen a hidegfront közeledésekor közvetlenül a front előtt süllyed, a front átvonulása után viszont hirtelen növekszik. A front áthaladása itt is szélfordulást eredményez, az átvonulást gyakran erős szélviharok, zivatarok kísérik.

A hőmérséklet a front áthaladásakor ugrásszerűen csökken (rövid idő alatt akár 5-10 °C értéket). A látástávolság a front átvonulása után megnő.

Két fajta hidegfrontot különböztetünk meg a meleg levegő áramlási sebességétől függően: az első típusú (lassú mozgású) és a második típusú (gyors mozgású) hidegfront tulajdonságai jelentősen eltérnek egymástól (21, 22. ábra).



21. ábra. Első típusú (lassú mozgású) hidegfront függőleges metszete



22. ábra. Második típusú (gyors mozgású) hidegfront függőleges metszete

Első típusú (lassú mozgású) hidegfront

Ha a meleg levegő frontra merőleges áramlási sebessége kisebb mint a hideg levegő ilyen irányú sebessége; akkor a frontfelület mentén a meleg levegő passzív felsiklást végez. Ez azt jelenti, hogy a hidegbetörés hatására a meleg levegő alsó része a front mentén visszafelé, felfelé áramlik. Ennek eredményeképpen az ilyen jellegű hidegfront felhőzete hasonlóságot mutat a melegfront felhőzetével. Az első típusú hidegfront felhőzete kevésbé, 50-100 km-rel a front előtt kezdődik és elnyúlik a front mögé. A meredekebb hajlásszög miatt a felhősáv rövidebb (100-300 km). A frontvonal előtt a meleg levegő feláramlásra kényszerül. Ez a folyamat rendszerint olyan heves, hogy Cb gomolyos felhők alakulnak ki, amelyekből már a front előtt záporos csapadék hullhat. A frontfelület mentén felsikló meleg levegőben réteges szerkezetű Ns, As felhők is kialakulnak. Ezeket a felhőket csendes csapadék kísérheti. Egy adott hely

felett a felhőzet és a csapadék megjelenése majdnem fordítottja a melegfrontnál észlelteknek. A felhősáv a front mögött elhúzódik.

Második típusú (gyors mozgású) hidegfront

A második típusú hidegfrontra a meleg levegő gyors áramlása jellemző. Ennél a típusnál aktív leáramlás jön létre, vagyis a meleg levegő frontra merőleges sebessége nagyobb, mint a hideg levegő sebessége. A hideg levegők a meleg levegőt feláramlásra kényszeríti. A gyorsan lesikló meleg levegő nem engedi, hogy a frontfelület mentén szétterüljön a felhőzet, A második típusú hidegfront előtt rendkívül erős a feláramlás, a kialakuló felhőzet gomolyos jellegű. A front felhősávja keskenyebb, mint az első típusú hidegfronté (kb. 100 km). A csapadék zömmel a front előtt hulló záporos jellegű, és a front áthaladása után gyorsan kiderül az ég.

Ha a betörő hideg levegő erősen labilis szerkezetű, akkor a hideg levegőben is gomolyos szerkezetű felhőzet, esetleg csapadék alakul ki.

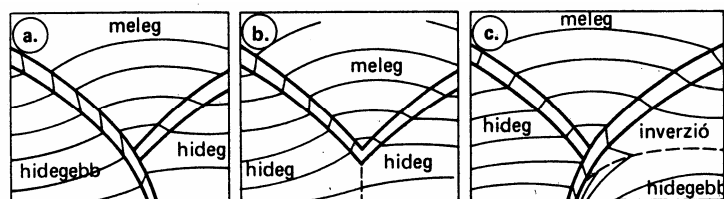
Okklúziós frontok

A hidegfrontok haladási sebessége nagyobb mint a melegfrontok haladási sebessége, ezért a hidegfrontok utoléri a melegfrontot. Ekkor a frontok mentén elhelyezkedő hideg légtömegek egymáshoz viszonyított hőmérsékletétől függően újabb front képződik. A két hideg levegő közül az alacsonyabb hőmérsékletűt *hideg*, a magasabb hőmérsékletűt *hűvös levegőnek* nevezzük. Az okklúziós frontok három típusát tudjuk megkülönböztetni.

A *hideg okklúzió* (pontosabban: hidegfront-típusú okklúzió) esetén a melegfrontot utóérő hidegfront mögött hidegebb a levegő, mint amely a melegfront előtt halad. Ezért a hidegfront nemcsak a melegséktort szorítja ki, hanem fölemeli magát a melegfrontot is az előtte haladó hideg levegővel együtt. Ez a legáltalánosabb eset, mivel a hátsóoldalon általában olyan hideg levegő áramlik be, amelyik közvetlenül a poláris övezetből érkezett.

A *semleges okklúziót* az jellemzi, hogy a két hideg levegőtömeg között (legalábbis az alsó szintekben) nincs hőmérsékleti kontraszt. Ezért az okklúzió folyamán a front a talajon eltűnik.

Végül a *meleg okklúzió* (melegfront-típusú okklúzió) sajátossága az, hogy a hidegfront mögötti hideg levegő viszonylag melegebb (hűvös levegő) a melegfront előtti hideg levegőnél. Ez pl. télen fordul elő, ha a ciklon a hideg európai szárazföld fölé érkezik. Ekkor ugyanis a meleg szektor előtt gyakran olyan levegő helyezkedik el, amely a kontinens fölött erősen le tudott hűlni, hátul viszont óceáni levegő áramlik, amely ilyenkor melegebb.

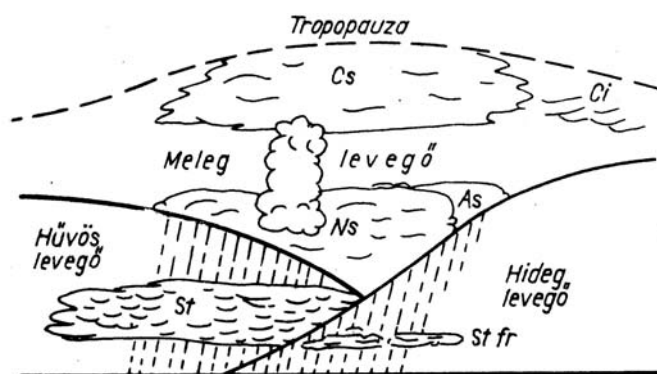


23. ábra. Okklúziós frontok típusai: a. hideg-, b. semleges-, c. meleg-okklúzió

A három különböző okklúziós front közül a két fontosabbat tárgyaljuk részletesebben.

Melegfront típusú okklúzió

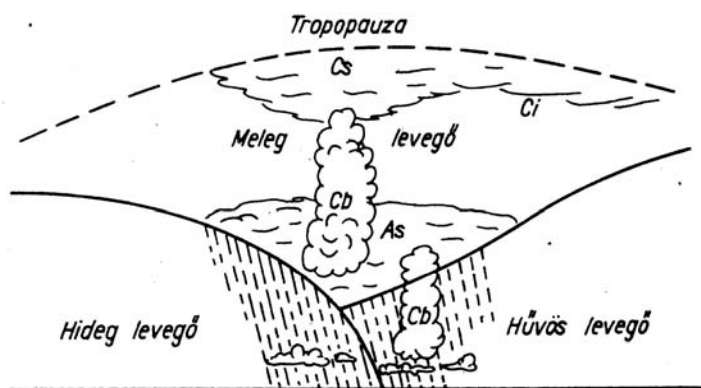
Ebben az esetben a hidegfront hideg levegője (hűvös levegő) magasabb hőmérsékletű a melegfront hideg levegőjénél. Amikor ez a hidegfront utoléri a melegfrontot, a hűvös levegő úgy viselkedik, mint az egyszerű melegfrontnál a meleg levegő, felsiklik a hideg légtömegre. A hidegfront felemelkedik a melegfronton. Ekkor a talajon maradó front melegfront. Az így keletkezett összetett frontot meleg okklúziós frontnak nevezzük. A hőmérsékletváltozás szempontjából úgy viselkedik, mint az egyszerű melegfront. A meleg okklúziós front Cs, As, Ns felhőrendszere zömmel réteges szerkezetű. A felső hidegfront előtt gomolyos Cb felhőzet is kialakulhat. A front csapadéka ennek megfelelően alakul. Egy adott hely felett átvonuló frontból először csendes csapadék hull, amely átmehet záporokba, majd ismét csendes, szitáló csapadékot észlelünk (24. ábra).



24. ábra. Melegfront típusú okklúzió függőleges metszete

Hidegfront típusú okklúzió

Ha a hidegfront hideg levegője alacsonyabb hőmérsékletű, mint a melegfront hideg levegője, akkor a hideg levegő a melegfront utolérése után a hűvös levegő alá nyomul, ahogyan az egyszerű hidegfrontnál történik. Ekkor a talajon lévő front hidegfront. Ezt az összetett frontot hideg okklúziós frontnak nevezzük. A hideg okklúziós front átvonulása után csökken a hőmérséklet. A front felhőrendszere hasonlóan a meleg okklúziós frontéhoz, mindkét irányban kiterjed. Ennek megfelelő a csapadéksáv elhelyezkedése: závorszerű csapadékot az alsó front közvetlen közelében észlelünk. A hideg okklúziós front felhő és csapadéksávja keskenyebb mint a meleg okklúziós fronté. A felhőzetben erősebb a gomolyos jelleg és ennek megfelelően a csapadék is inkább záporos (25. ábra).



25. ábra. Hidegfront típusú okklúzió függőleges metszete