

CIKLUSOK ÉS RITMUSOK A LÉGKÖRI MOZGÁSRENDSZEREKBE

BÉLL BÉLA
AKAD. LEV. TAG

A lokális légköri folyamatokban — mind a komplex időjárás, mind az egyes meteorológiai elemek változásában — a Föld forgásával és keringésével, továbbá a holdhatásokkal, napaktivitással összefüggő periódikus változásokon kívül bizonyos ismétlődési hajlamot fedezhetünk fel.¹ Az ismétlődés időtartama (kváziperiódusa) és térbeli méretei (kiterjedése, hullámhossza), azaz idő- és térparaméterei nagyon változók, statisztikai eloszlásuk sztochasztikus jellegű. Ezekkel az ismétlődő jellegű változásokkal kapcsolatban — megkülönböztetésül a Föld határozott periódusokhoz kötött mozgásai és az ugyancsak periódikusnak feltételezett nap- és holdhatások által keltett s ezekkel a légkörben felhalmozódott bonyolult labilitási energiakészletek miatt csak bizonyos szinten korrelálható légköri jelenségekkel szemben — nem indokolt „periódus”-okról, hanem csupán ciklusokról, ritmusokról beszélni. Ha e két szó használatában SZÁDECZKY-KARDOSS ELEMÉR javaslatára megkülönböztetjük a körfolyamat jelleggel, illetőleg a hullámszerűen ismétlődő folyamatokat, akkor az előbbieket *ciklusos*, az utóbbiakat *ritmusos jelenségeknek* nevezhetjük.

A ciklusos folyamatokra példa lehet a *hidrológiai ciklus* légköri szakasza, amely magában foglalja a földi hidroszféra globális körforgalmának azt a részét, amely a felszínről elpárolgó víznek az atmoszférába lépésétől a lehulló csapadékkal a talajra visszaérkezéséig terjed. A ciklus átlagos időtartamát a légkör teljes vízkészletének pillanatnyi átlagából ($13 \cdot 10^3 \text{ km}^3$) és a felszínre elérő csapadékvíz globális évi mennyiségéből vagy az ezzel egyenlő globális évi elpárolgásból ($526 \cdot 10^3 \text{ km}^3 \text{ év}^{-1}$) megbecsülhetjük [2]. Ha a ciklus periódusidején vagy röviden „periódus”-án egy vízcsepecske átlagos légköri tartózkodási idejét értjük, akkor ezt az időtartamot kerekén 10 napra becsülhetjük

¹ Lábjegyzet / A perióduskutatás általánosan alkalmazott módszereivel (harmonikus analízis, átkaroló középkepzés, individuális analízis, korrelációs számítás, szélső értékek tér- és időmeghatározóinak egybevetése stb.) az évszázados kutatások során számos, többé-kevésbé statisztikailag igazolt periódust (7, 14, 21, 28 napos, 11, 5, éves stb. periódust) találtak, amelyek realitásával, prognosztikai felhasználásával gazdag hazai (BERKES ZOLTÁN, NÉMET TIVADAR) és nemzetközi irodalom foglalkozik. Ezt a témát, amely ankétjaink programjában is helyet kapott [1], itt részletesen nem ismertetjük.

(ennyi időnkint kell a légkör teljes vízkészletének megújulnia, hogy fedezni tudja a globális évi csapadékot). Ez a tartózkodási idő elenyésző a többi hidroszféra-rezervoár teljes vízcserejéhez szükséges időtartamhoz képest (a kontinensek felszínén és rétegeiben: 640 év, az óceánokban: 3000 év, a sarki jégben: 12 000 év). Ezek a különbségek a légkör mozgékonyaságára, folyamatainak aránylag nagy sebességére utalnak.

A víz légköri ciklusának térparaméterei a körforgalom nagy horizontális, ugyanakkor aránylag kis vertikális kiterjedésére engednek következtetni. Az atmoszférába belépő vízcsepke az általános cirkulációval hemiszférikus méretű horizontális távolságokat futhat be, de összességében is jóval kisebb méretben előfordulhat, hogy néhány 10 km²-nyi keresztmetszetű légoszlop zivatarfelhőjében az egész ciklus lejátszódik. Mindenesetre a ciklus a troposzférára korlátozódik, maximális kiterjedése 10 km alatt marad s alulról a felszín, felülről a sztratoszféra stabilis rétege a ciklust gyakorlatilag lezárja. A víz légköri körforgalma tehát globális méretekben *kvázihorizontális* jellegű.

Hasonlóképpen ciklusos körforgalomként foghatók fel a kén- és szénvegyületek s különböző aeroszolok légköri ciklusai, amelyekben a kémiai átalakulások során mindhárom halmazállapotban előforduló anyag tér- és időparaméterei nagyságrendileg megegyeznek a víz légköri körforgalmának jellemzőivel.

A légkör ritmusos folyamatai közé tartoznak az időjárás és a meteorológiai elemek hullámszerű vagy örvénylő jellegű változásai a hullámhosszal, ill. örvényátmérővel mint térparaméterrel és a periódusidővel (periódussal) mint időparaméterrel. A légkör hullámszerű, örvény jellegű ritmusai egy egyensúlyi állapotnak valamely impulzus keltette lokális zavaraira, az elemek skaláris vagy vektorterének „háborgás”-aira emlékeztetnek.

A háborgások a környező tér stabilis légállapota esetén az időben és térben csillapódó hullámok vagy örvények formájában jelentkeznek, amelyeknek nemcsak amplitudójuk vagy átmérőjük, hanem hullámhosszuk és periódusuk is változik a környező inhomogén térben.

Az időjárás alakulása szempontjából jelentősebbek azok a háborgások, amelyeknek környező terében labilitási energia halmozódott fel. Ebben az esetben a labilitási energia kiváltódásával a kezdeti egyensúlyi állapotból történt bármily csekély kilendülés határtalan eltolódássá válnék, ha valamely stabilizáló effektus ezt meg nem akadályozná s a tehetetlen rendszert az egyensúlyi állapot körüli ritmikus ingadozásra nem kényszerítené. *Hatékony és többé-kevésbé tartós hullámszerű légköri háborgások kialakulásához ezek szerint megfelelő kiváltó impulzusra, a környező térben felhalmozódott labilitási energiára és megfelelő stabilizáló effektusra van szükség.*

Az időjárás ritmusos folyamatai legjellegzetesebben a légköri mozgásjelenségekben, a többé-kevésbé elkülönülő mozgásrendszerekben, s az ezekkel szoros kapcsolatban álló, de integráló jellegű nyomásingadozásokban jelen-

nek meg. Bizonyos időeltolódásokkal vagy szakaszos jelleggel megfigyelhető ezenkívül a hőmérséklet, a borultság, a csapadék és számos más meteorológiai elem térbeli és időbeli változásának ritmusaiban is.

A légköri ritmusok általános jellegzetessége a változók tér- és időspektrumainak rendkívül széles kiterjedése: térméreteik a mm-től a 10 000 km nagyságrendig, időparamétereik a másodperc tört részétől az éves nagyságrendig nyúlnak (a paleoklimatológia rendkívül hosszú kváziperódusaitól eltekintünk, ezekkel ankétunknak másik előadása foglalkozik).

A légköri mozgásrendszerek ritmusait bizonyos mértékig integráló légnyomáshullámok már több évtizeddel ezelőtt felhívták a figyelmet a légkör saját- és kényszerrezgéseire vagy (globális méretekről lévén szó) „lengéseire”. MARGULESnek a század elején elvégzett részletes elemzése kimutatta, hogy a légkör különböző periódusú saját rezgésekre, ún. „szabad” lengésekre képes. Közülük leghosszabb a 12 órás periódusú szabad lengés, amely a légkörben a közepes szélességeken mintegy 300 ms^{-1} fázissebességgel — ODDONE [3] feltételezése szerint az Egyenlítőn a magasabb légrétegekben nagyobb, a pólus felé haladva az alacsonyabb szintek sűrűbb levegőjében kisebb fázissebességgel — terjed, hullámhossza 10 000 km nagyságrendű.

LORD KELVIN feltételezése (1882), majd MARGULES említett pontos analízise szerint a légkör 12 órás szabad lengésével függ össze a légnyomás napi változásában az egész Földön megtalálható félnapos hullám stabilitása, RÓNA ZSIGMOND szerint „a légkör igazi árapálya” [4]. Maximuma kb. 20 perces eltéréssel mindenütt 10—11 óra között, ill. 22—23 óra között, minimuma 4—5 óra között, ill. 16—17 óra között (helyi idő) jelentkezik. Fázissebessége az Egyenlítőtől a pólusok felé csökken s megegyezik a földfelszíni pontok forgássebességével, azaz az Egyenlítőn 465 ms^{-1} , a 60° szélességen ennek a fele, hullámhossza pedig ugyancsak 10 000 km nagyságrendű. Feltehetően valamely, félnaponként váltakozó impulzus (pl. a Nap—Föld árapálya, felsőlégköri napszél-hatás vagy a termikus konvekció megindulását megelőző és lezáró légköri feszültség-ingadozás, azaz termikus hatás) és a légkör szabad lengésének rezonanciája tartja fenn a félnapos nyomáshullám globális jelenségét, amelynek amplitúdója az Egyenlítőn 1 mb, a magasabb szélességeken 0,1 mb nagyságrendű, jóval határozottabb, mint a légnyomás napi menetének lokálisan változó és zavart, termikus okokra visszavezethető egynapos hulláma.

A kiváló impulzusok sorában a Nap—Föld árapálya a nagy távolság miatt jelentéktelennek tűnik, de annak ellenére, hogy ez az árapálykeltő erő kb. 2,5-ször kisebb, mint az általában tekintetbe vett Hold—Föld árapályé, az egymáshoz közel eső félnapos periódusok mégis kedvező lehetőségeket teremtenek a rezonancia jelenség és ezzel az effektus megnövekedése számára. RÓNA megfogalmazása szerint: „a légkör hullámozása a félnapi periódus iránt fogékonyabb, mint az egésznap iránt” s hozzátehetjük: mint a holdhatás iránt

annál is inkább, mivel a légnyomás változásában holdnaphoz kötött időszakosságot nem sikerült kimutatni.

A légnyomás lokális időbeli változásának harmonikus analízisével számos, különböző periódusú nyomáshullámot sikerült a tengerszinti állomások adataiból kimutatni, s gazdag irodalmi anyag foglalkozik a hullámok jellemzőinek (amplitúdó, fázis stb.) térbeli eloszlásával és időjárási kapcsolataival is [5]. Mindenesetre a hullámokat kiváltó impulzusoknak, valamint a tér- és időparamétereket szabályozó légköri mechanizmusnak részletei nem ismertek.

A nyomásváltozás időbeli menetében integrálódó mechanikai és termikus hatások mellett az újabb időben előtérbe került a légköri mozgásmechanizmus statisztikai szemlélete és ennek kapcsán a különböző méretű és élettartamú ritmikus mozgásrendszerek széles spektrumának tanulmányozása. A spektrum rövid hullámhosszú végén a mikroturbulencia *cm* nagyságrendű vagy ennél is rövidebb térméretű örvényei, másik végén a 10 000 km nagyságrendű ultrahosszú planetáris hullámok helyezkednek el hasonlóan több nagyságrendre kiterjedő időparaméterekkel.

Az ezzel összefüggő kutatások sarkalatos kérdése az, hogy ezen mozgásrendszerek tér- és időméretei (hullámhossz és periódus), továbbá a mozgásrendszereket létrehozó hatások és energiaáramok jellemzői folytonosan töltik-e ki a spektrum nagyságrendi skáláit, vagy eloszlásukban kedvezményezett tartományok, ezek között pedig a mozgásrendszerek kialakulására és fennmaradására kedvezőtlen feltételeket sejtető hézagok, energiaszint-szakadások vannak.

Mind az energiaspektrum, mind a tér- és időparaméterek több nagyságrendet átfogó széles kiterjedése a mozgásrendszereket kiváltó impulzusok, valamint az energiaforrások merőben eltérő eredetével, hatáskörzeteinek, intenzitásuknak nagy különbségével magyarázható.

A légkör ritmikus folyamatait fenntartó hatások és erőkterek részben extraterresztikus vagy globális földi eredetűek, részben pedig a légkör belső, stabilitási energiáiból származnak. Közülük a jelentősebbek:

1. *A Nap—Föld gravitációs hatásából* eredő légköri árapály-hullám, amely a légkör közel azonos periódusú saját lengésével felerősödve az előzőekben már említett félnapos légnyomáshullámban jut kifejezésre. A ritmikus folyamat hullámhossza kb. 20 000 km, periódusa 12 óra.

2. *A Föld nehézségi erőterében* olyan kvázihorizontális felületeken, ahol a sűrűség skaláris terének szakadása van (pl. inverziós felületek) a felületre merőleges impulzus-komponens hatására a vízfelületekhez hasonlóan *légköri gravitációs hullámok* keletkeznek. Hullámhosszuk a tengerszinti sűrű közegben 10–100 m nagyságrendű, de több kilométer is lehet, a magaslégkör ritka levegőjében pedig planetáris méretű gravitációs hullámokat figyeltek meg.

Az impulzusok megszűntével a gravitációs hullámok mozgása a súrlódás következtében csillapodni kezd és hamarosan megszűnik (stabilis hullámok).

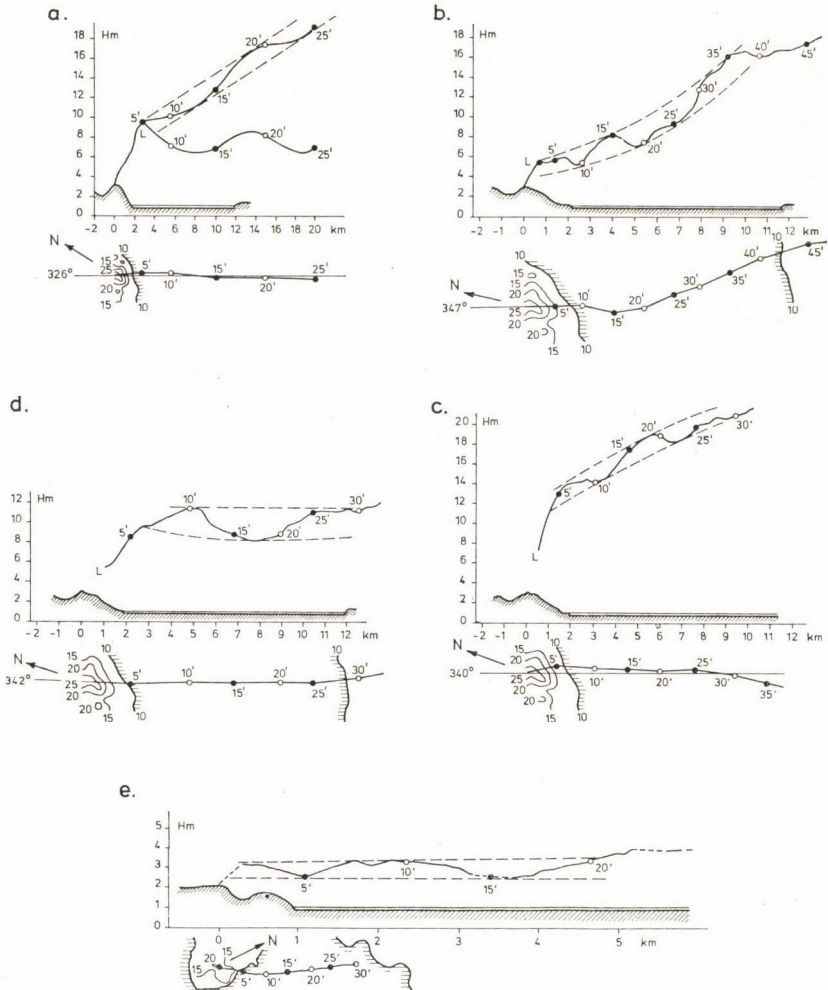
Jól fejlett gravitációs hullámok inverziós felületeken, ill. néhány 10 m vastagságú kvázihorizontális átmeneti zónákban, 1–3 km magasságban hullámfelhők formájában gyakran láthatókká válnak. A hullámhegyeknek (feláramlás) hosszanti felhőcsíkok, a hullámvölgyeknek (leáramlás) felhőmentes zónák felelnek meg a kiterjedt párhuzamos szerkezetű felhőrendszerben.

Ugyancsak gravitációs hullámok keletkeznek erős szélben a szélirányra többé-kevésbé merőlegesen húzódó hosszanti akadályok, hegygerincek mögött (a hegy „lee-oldalán”). Ezeket *orografikus gravitációs hullámoknak* nevezzük. A kiváltó impulzus a szélnek a hegygerincre merőleges komponense, a hullámmozgást létrehozó és fenntartó effektus pedig a felemelt légtömeg tehetetlensége. A széllel ellentett lee-oldalon ugyanis az emelkedő levegő nála ritkább környezetbe kerül, ezért süllyedni, majd a számára mind sűrűbbé váló környezetben a hidrosztatikus felhajtó erő hatására emelkedni kezd s a széllel vízszintes irányban eltávolodva hullámmozgásra kényszerül. A hullámok kimutatása a domborzat nagy változatossága, az összefonódó impulzusok miatt nehéz és csak kedvező terepen lehetséges.

Az orografikus gravitációs hullámok kimutatására kedvezőnek bizonyult a Balaton víztükre fölötti néhány km magas légtér, amelyben az uralkodó északnyugati áramlás hatására a Balaton-felvidék hegyvonulatainak lee-oldalán jellegzetes szinuszhullámok alakulnak ki. Ezeket a víztükör fölött orografikus hatások már nem zavarják s tér- és időparamétereiket a légpályákat követő kiegyensúlyozott léggömbökkel tanulmányozni lehetett [6]. Az 1. ábra az északnyugati partot szegélyező hegytetőről (*Szabadság-kilátó, Tihany-Akasztó hegy*) felbocsátott úszó léggömbök pályáinak a szélirányba eső függőleges metszetét mutatja. A vízszintes tengelyen a felbocsátás helyétől mért távolság, a függőlegesen a tengerszint fölötti magasság van felmérve. A tó víztükre fölött (kettős vízszintes vonal) jól láthatók az orografikus gravitációs hullámok (L az úszó léggömbök szabadon bocsátásának helye, a pályavetületre írt számok az elbocsátás utáni percek száma). Az ábráról a gravitációs hullámok hossza és periódusa jól leolvasható.

A hullámok kialakulásához szükséges stabilizáló tényező a légkör *hidrosztatikai stabilitása* (mérőszáma a függőleges hőmérsékleti gradiens eltérése a labilitás határát jelző adiabatikus hőmérsékleti gradienstől). A gravitációs hullámok hossza és periódusa egyenesen arányos a szélesebséggel és fordítva a stabilitási tényezővel. Ha a légkör hidrosztatikai egyensúlya labilissá válik (pl. a felszín erős felmelegedése esetén nyáron a déli órákban), a hullámhossz és a periódus végtelen nagy értéket vesz fel: hullámmozgás nem alakul ki. (2. ábra: a 10. és a 15. perc között, felhevült talaj fölött bekövetkezett gyors emelkedés.)

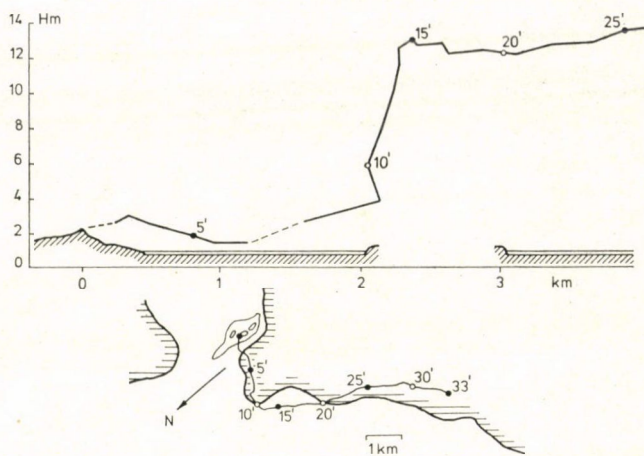
A Balaton fölött az átlagos légrétegződésnél stabilisabb egyensúlyú légállapotban talált orografikus gravitációs hullámok hossza $3\text{--}10\text{ ms}^{-1}$ szélesebség esetén nyári délelőttökön $2\text{--}10\text{ km}$, periódusa $10\text{--}15$ perc között



1. ábra. Orografikus gravitációs hullámok a Balaton fölött. (Úszó léggömbök pályáinak vetülete a vízszintes terepre és a szélirányba eső függőleges síkra): a) Szabadság-kilátó, 1958. június 5. 10^h. A hullámok tengelyének emelkedő tendenciája a léggömb kiegyensúlyozatlanságának következménye, ennek korrekciójával vízszintes tengelyű hullámvonal szerkeszthető; b) Szabadság-kilátó, 1958. június 9. 9^h, c) Szabadság-kilátó, 1958. augusztus 9. 9^h, d) Szabadság-kilátó, 1958. augusztus 9. 14^h, e) Tihany-Akasztóhegy, 1959. szeptember 12. 12^h,

volt. A hullámok amplitúdója 100 m nagyságrendű, azaz nagyságrendileg kisebb a hullámhossznál. Az orografikus gravitációs hullámok általában stabilisak és kvázihorizontális jellegűek.

A gravitációs hullámok planetáris méretű, a szélességi körök 1/3-át, 1/4-ét kitevő hullámhosszakkal megfigyelhetők a felső sztratoszférában és a mezoszférában, sőt a termoszféra ionizált és neutrális részecskéinek mozgásában is. Jelentőségüket elsősorban energiaátviteli szerepükben látják [7] az alacsony-



2. ábra. Tihany—Csúcshegy, 1959. június 5. 12r. Erős termikus konvekció a 9—15. perc között a pálya szárazföldi szakasza fölött mintegy 1300 m magasságig

nyabb atmoszférikus szintek és a magas légkör között. Feltehető, hogy a gravitációs hullámokkal a termoszférába átvitt és itt hővé alakult kinetikus energia egyenlíti ki a termoszféra hő- és sugárzási mérlege között talált eltérést.

A gravitációs hullámok keletkezési fészke nem ismeretes. Mindenesetre a magaslégkörben a hirtelen fellépő mágneses háborgásokkal kapcsolatos elektromos áramok hőhatása (JOULE-hő) a sarkifény zónájában gravitációs hullámok kiváltó impulzusa lehet. Kétségtelen, hogy ezeknek a *planetáris méretű* (10 000 km térméretű és néhány nap periódusú) *magaslégköri gravitációs* hullámoknak fontos szerepük van a légkör szférái között végbemenő energia- és mozgásátvitelben.

Folytatva a légkör ritmikus folyamatait előidéző földi erőterek felsorolását, említésre méltó.

3. *A földforgás eltérítő ereje*, amely a Földhöz rögzített, nem inercia-rendszerben valamely impulzus által mozgásba hozott légtömeg pályáját körré vagy vízszintes mozgásösszetevő esetén hullámmozgássá formálja. A földi koordináta-rendszerben a nagytérségű (5 km-nél hosszabb pályákra ráhelyeződő) „*tehetlenségi kör*” sugara, vízszintes szélkomponens jelenlétében pedig a „*tehetlenségi hullám*” amplitúdója

$$a = \frac{v}{2\omega \cdot \sin \varphi},$$

ahol v az impulzus okozta kezdő sebesség, ω a földforgás szögsebessége, φ pedig a földrajzi szélesség. A ritmikus mozgás periódusa pedig

$$t = \frac{12 \text{ csillagóra}}{\sin \varphi}$$

A 45° szélességen $t = 0,7$ csillagnap. A hullámhossz a szélsébségből és a periódusból kiszámítható, 45° szélességen 10 ms^{-1} szélsébség esetén 600 km , az Egyenlítőn végtelen, azaz ott tehetetlenségi hullám nem alakul ki.

A tehetetlenségi hullám stabilizáló tényezője, amely megakadályozza a hullámok amplitúdójának spontán növekedését, maga a földforgás állandó szögsebessége.

A tehetetlenségi hullám amplitúdója a súrlódás következtében idővel csökken. Végül a hullámeffektus, amely más, nagytérségű mozgásformákra észrevehetően ráhelyeződik, hatástalanná válik és a hullámmozgás az erők egyensúlyának megfelelő stacionárius mozgásba megy át. Végeredményben tehát a *léggör tehetetlenségi hullámai stabilisak*, hullámhosszuk 1000 km , periódusuk *nap* nagyságrendű.

Az előzőekben felsorolt hatások és erők részben extrateresztrikus, részben földi, globális méretű hullámkeltő tényezők voltak. Az így létrejövő ritmikus mozgásrendszerek stabilis folyamatok, fennmaradásukhoz kiváltó impulzusokra, állandó erőkerekre és stabilizáló effektusokra van szükség. Az időjárási folyamatokra gyakorolt hatásuk a következőkben tárgyalandó hullámkeltő tényezők mellett elhanyagolható, légkörfizikai, geonómiai szempontból azonban — különösen a magas légkörben — nem hagyhatók figyelmen kívül.

A hullámkeltő tényezők másik csoportja a légkör belső labilitási energia-készletéből fedezi a ritmusok fenntartásához szükséges energiaáramot. A labilitási energia kellő felhalmozódása esetén a folyamat megindításához olyan csekély impulzusra van szükség, aminő a nyugtalan légkörben minden pillanatban rendelkezésre áll. Végül a stabilizáló effektust stabilis egyensúlyú határreégeivel, a súrlódási veszteségekkel, a felszínnel, mint minden mozgást lefékező határfelülettel maga a földi légkör biztosítja.

A *léggör belső labilitási energiái* a tömeg (sűrűség) és a mozgás (szél) függőleges és vízszintes elrendeződése következtében halmozódnak fel kisebb-nagyobb kiterjedésű légterekben és nagyon változó időtartam alatt. Ennek megfelelően felszabadulásuk a mozgásrendszerek széles skálájának kialakulására vezet. Az energiafelhalmozódásnak és ezzel a mozgásrendszereknek több — a következőkben 4–6. alatt bemutatandó — csoportját szokás megkülönböztetni, amelyek mint labilis mozgásrendszerek bizonyos elvi (dinamikai) elkülönüléssel, de kinematikai hasonlósággal csatlakoznak az eddig tárgyalt stabilis mozgásrendszerekhez.

4. *A függőleges légoszlop hidrosztatikai labilitása*, amely a hőmérsékletet és a nedvességtartalmat kifejező virtuális hőmérséklet függőleges gradiense-nek a labilitás határát túllépő értékeinél realizálódhat $10\text{--}100 \text{ km}^2$ keresztmetszetű légoszlopokban olyan 3 dimenziós áramlási cellák (termikus konvekciós cellák) kialakulására vezet, amelyek függőleges méretei ($1\text{--}10 \text{ km}$) nem hanyagolhatók el horizontális kiterjedésük mellett. Ha a cella mozgásrendszerét ritmikus folyamatnak fogjuk fel, térparaméterét $1\text{--}10 \text{ km}$, idő-

paraméterét pedig néhány óra nagyságrendűnek becsülhetjük. A termikus konvekció látható eredménye a konvektív gomolyfelhő, nagyobb függőleges kiterjedésben a konvektív zivatar kb. 10 km magas felhőtornya. Stabilizáló effektusa a felszín és a légkör stabilis egyensúlyú rétegei (szélső esetben a sztratoszféra) közötti „játéktér” korlátozott volta, valamint a lokálisan felhalmozódott labilitási energiakészlet kimerülése.

5. A szél vektorterében a szélvektor függélyesmenti változása, az ún. *függőleges szélnyírás* bizonyos határt túllépve a dinamikus labilitási energia felhalmozódásának forrása lehet. Különösen diszkontinuitási felületeken, ahol a szélmezőnek szakadása van, lépheti túl a szélnyírás azt a kritikus határértéket, amelyen túl az áramlás labilissá válik s a felszabaduló energia ciklusos háborgás: *szélváltozási határfelületi hullámok* formájában jelenik meg (KELVIN-HELMHOLTZ-féle hidrodinamikai instabilitás, ill. hullámok).

A szélváltozási határfelület hullámainak térmérete 10^2 – 10^3 m, időparamétere perc, ill. óra nagyságrendű.

A felszínközeli légrétegben a felszíni súrlódás fékező hatása miatt a függőleges szélnyírás rendszerint olyan nagy, hogy még stabilis hidrosztatikus egyensúly esetén (pl. a reggeli órákban) is a felszínközeli légréteg áramlási mezejét mikroturbulens mozgásrendszerek (*sec* nagyságrendű idő- és *cm* nagyságrendű térparaméterekkel) alkotják. A hidrosztatikai stabilitás fékező hatása a felszín felmelegedésével a déli órákban csökken s a szélnyírás felülmúlhatja a stabilis rétegződés effektusát. Emiatt a nyári napok késő délelőtti óráiban (10 óra után) a mikroturbulancia hirtelen átlép a termikus konvekció nagyobb léptékű mozgásrendszerébe.

Mindenenesetre a függőleges hőmérsékleti gradiens és a szélnyírás kritikus értékeivel jellemezhető hidrosztatikai, illetőleg hidrodinamikai labilitás olyan mozgásrendszerek kialakulásához vezet, amelyek térparaméterei 20 km-nél, időparaméterei 1 óránál kisebbek, függőleges méreteik a vízszintesekkel összemérhetőek, azaz 3 dimenziós mozgásrendszerek. Összefoglaló nevük a nemzetközi konvencionális nevezéktanban: *mikroskálájú mozgásrendszerek*. Magukban foglalják a mozgásrendszerek nagyságrendi skálájának legkisebb egységeit: a mikroturbulencia 3 dimenziós örvényeit, a felhevült talaj fölött kialakult néhány méter átmérőjű és néhány mp periódusú forgószeleket, a szélváltozási határfelület hullámait, a termikus konvekció 1–10 km magas celláit. Mindezeket a vertikális rétegződésből eredő energiaforrás és a 3 dimenziós kiterjedés tereli egy csoportba..

6. Az időjárási jelenségek leghatásosabb s egyben a ritmusos folyamatok legaktívabb energiaforrását a légkör horizontális tömegeloszlásában és áramlásában a vízszintes hőmérsékleti gradiens és a vízszintes szélnyírás értékeivel kifejezhető *barotróp és baroklin instabilitási formák* képezik. A primér energiaforrás a felszínt felmelegítő napsugárzás és a globális sugárzási egyenleg övezetes eloszlása, hőenergia felhalmozódással az alacsony és negatív sugárzási

egyenleggel a magasabb földrajzi szélességeken. Az ebből származó meridionális hőmérsékletsökkenés (a pólusok felé) együtt jár a vízszintes hőmérsékleti gradiens megnövekedésével, a nyugati szélrendszer és a szélnyírás megerősödésével (vízszintesen a pólusok felé) a mérsékelt övekben [8].

A különböző hőmérsékletű és sűrűségű szubtrópusi és poláris légtömegek határzónáiban, az ún. frontálzónákban a stabilis gravitációs és tehetetlenségi hullámok, továbbá a szélváltozási határfelület labilis hullámai nagy tér- és időparaméterekkel jellemezhető *ciklonális hullámokká* növekedhetnek. Térméreteik a kezdő és a fejlett állapot között néhány km-ről néhány 1000 km-re növekednek, periódusuk néhány perceről 1000 km-es hullámhosszak fölött 15–40 órára nő. A hullámok 500 km alatt stabilisak, mivel hullámkeltő tényezők közül a gravitációs hullámoknak a hullámhossz növekedésével csökkenő stabilitása jut érvényre. 500 és 3000 km között a ciklonhullámokban a gravitációs hullámok stabilitása csökken, a tehetetlenségi hullámoké nő, de együtt sem tudják ellensúlyozni a szélváltozási felület hullámainak labilitását: a ciklonális hullámok ebben a nagyságtartományban labilisak. Végül a 3000 km-nél hosszabb hullámokban túlsúlyra jut a tehetetlenségi hullámok stabilitása, a ciklonális hullámok ekkorára megnövekedve stabilisakká válnak [9].

A mérsékelt öveknek a szélességi körökkel közel párhuzamos nyugati áramgyűrűjében az áramlási tér szűkülése miatt [8] fokozódó horizontális szélnyírás labilitási energiája hosszú hullámú háborgások formájában realizálódik és fedezi a hullámok kinetikai energiaszükségletét. Az így keletkezett ún. ROSSBY-féle hullámok hossza a szélesebbég négyzetgyökével és a földrajzi szélességgel nő [10]. Például a mérsékelt szélességeken (45°) az átlagosnak megfelelő 25 ms^{-1} szélesebbég esetén a szabadléghkör kb. 5 km magas rétegében a ROSSBY-hullámok hossza 8000 km. Emiatt a 28 000 km hosszú 45° szélességi körön 3–4 ROSSBY-hullám fér csak el. A ROSSBY-hullámok lassan, a rajtuk átvonuló levegőnél jóval kisebb sebességgel vándorolnak a pólus körül, mint a pólusközpontú *poláris ciklon* szélességi körökkel közel párhuzamos áramvonalainak gyakorlatilag állóhullámai.

A ROSSBY-hullámok a szabadléghkör ritmikus jelenségei. A felső troposzférában mint a futóáramlás hosszú hullámai jelennek meg, de felfedezhetők, mint „*planetáris hullámok*” a sztrato- és mezoszférikus cirkulációban is. Az alsó troposzféra sűrűbb levegőjében a hullámok öbleiben gyakran kialakuló mérsékeltégövi ciklonok 1000 km nagyságrendű mozgékonyabb örvényei a jellegzetes nagy térségű mozgásformák.

A ROSSBY-hullámok a mozgásrendszerek spektrumának hosszú hullámú, nagyperiódusú szélén helyezkednek el. Pólus körüli lassú mozgásukra, fázis-sebességükre jellemző, hogy egy-egy megfigyelő helyen a hullám átvonulását jelző állapot (pl. a nyomás- vagy a szélmaximum) néhány napos ritmussal ismétlődik.

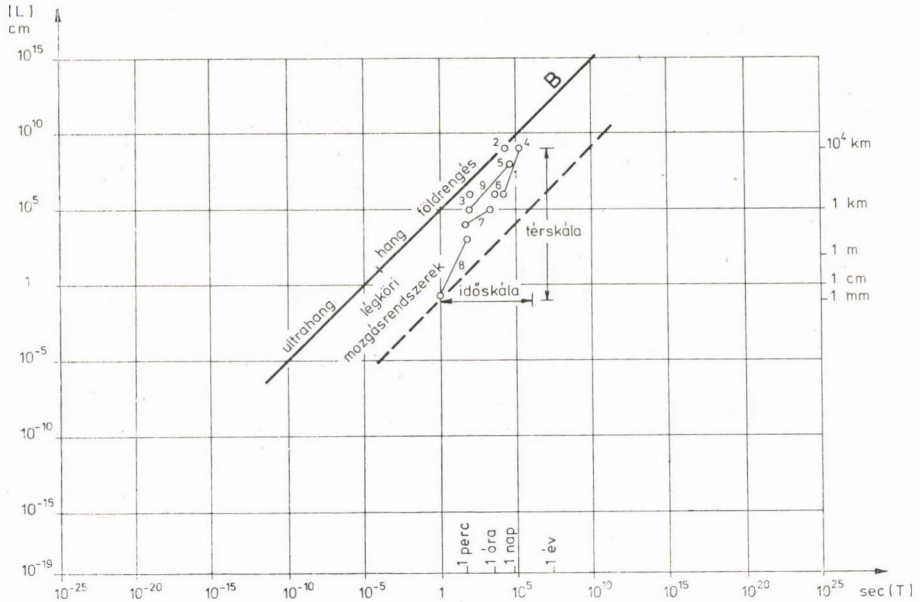
A nemzetközi nevezéktan az 500 km-nél nagyobb térméretű és 48 óránál hosszabb periódusú mozgásrendszereket a *makroskálájú mozgásrendszerek* csoportjába sorolja. Közös tulajdonságuk a horizontális tömeg- és mozgáseloszlásból származó barotróp és baroklin instabilitási energiaforma és a mozgásrendszer nagy vízszintes és aránylag kis függőleges kiterjedése, azaz *kvázi-horizontális* jellege.

Ha az időjárás alakulásában döntő jelentőségű labilis mozgásrendszereket (4–6. pontok) áttekintjük, két nagy csoportot különíthetünk el: a mikro- és a makroskálájú mozgásrendszereket, amelyek a légkör labilis energiakészletének két alapvető forrásából: a vertikális, ill. a horizontális tömeg- és mozgáseloszlásból származó instabilitási energiakészletből merítik kinetikus energiájukat. Szemléletesen úgy is mondhatjuk, hogy *az energia két nyíláson át, a mozgásrendszerek rövid- és hosszúhullámú végén áramlik be a légkör mozgásmechanizmusába.*

Az energiaspektrum, a mozgásrendszerek tér- és időspektrumához hasonlóan több nagyságrendre terjed ki. KOPPÁNY GYÖRGY [11] becslése szerint a legkisebb, néhány m² területű mozgásrendszerek (forgószelek) kinetikus energiája 10⁴–10⁵ Joule, élettartama 10 sec nagyságrendű. A makroméretű mozgásrendszerek (ciklonok, frontálzónák) kinetikai energiája 10¹⁸–10²⁰ Joule-ra, élettartamuk 10⁷ sec-ra becsülhető.

Számos, a mozgásrendszerek kinetikus energiájára irányuló mérésorozat (pl. a szélsébség finomsztruktúrájú regisztrálása) és elméleti megfontolás arra utal, hogy *a mozgásrendszerek kinetikai energiája nem folytonosan tölti be az energiaspektrum nagyságrendi, tér- és időskáláját, hanem egyes tartományokban, elsősorban a makroméretű mozgásrendszerek rövid hullámhosszú oldalán az energiaszint szignifikáns szakadása sejthető.* Ez az érdekes inhomogenitás egyszerűen magyarázható [12] a légköri instabilitási energia említett két formájának elkülönülésével, továbbá ezek maximumainak elhelyezkedésével a rövidebb és hosszabb tér- és időméretű mozgásrendszerek tartományában.

Ennek ellenére számos megfigyelésből arra következtethetünk, hogy maguknak a mozgásrendszereknek tér- és időparaméterei a nagyságrendi skálát folytonosan, hézagok nélkül töltik ki a mm nagyságrendtől a 10 000 km-es hullámokig, ill. a *néhány sec – több nap* időintervallumban. Ez a látszólagos ellentmondás az energiaspektrum hézagos és a mozgásspektrum folytonos jellege között feloldható, ha feltételezzük, hogy a makroméretű mozgásrendszerek a légkör sűrűbb rétegeiben kisebb hullámokká, örvényekké esnek szét s ez a disszipációs effektus tovább folytatódik a nagyságrendi skálán. A mikro- és a makroskálájú mozgásrendszerek közti nagy hézagot így közepes méretű: *mezoskálájú mozgásrendszerek* (alacsonyszinti „jet”-ek, a frontok viharvonalai stb.) töltik be, de ide sorolhatók a napi periódusú parti – tengeri, hegy – völgyi mozgásrendszerek mezoméretű (1–10 km) helyi szélrendszerei is.



3. ábra Léggöri mozgásrendszerek tér- és időskáliái. (Az ábra a paleoklimatológiai hosszú ciklusokat és a periódikus léggöri folyamatokat nem tartalmazza). 1. a víz léggöri ciklusa; 2. a légkör szabad lengése; 3. orografikus gravitációs hullám; 4. planetáris gravitációs hullámok, ROSSBY-féle hullámok; 5. tehetlenségi hullámok; 6. termikus konvektív cellák; 7. szélváltási határfelületek hullámai; 8. mikroturbulencia örvényei; 9. mérsékeltövi ciklonhullámok

A mezoléptékű mozgásrendszerek tér- és időparamétereinek konvencionális intervallumai: 20–500 km, ill. 1–48 óra.

A magasléggör hosszú gravitációs hullámai áttérjedve a sűrűbb, alacsonyabb légrétegekbe szintén beilleszkednek a troposféra mozgásrendszereinek spektrumába és részlegesen betöltik a skála hézagait.

Ilyen formán indokolt a léggöri ciklusos és ritmusos folyamatok tér- és időparamétereit összefogva ábrázolni a szokásos logaritmikus skálabeosztásban, amely lehetővé teszi a több nagyságrendre kiterjedő paraméterek teljes spektrumának figyelembevételét (3. ábra).

A léggöri mozgásrendszerek idő- és térbeli reprezentánsai: a T periódus és az L hullámhossz a $(\log T, \log L)$ koordináta-rendszerben az anyag ismétlődő (ciklusos és ritmusos) folyamatainak meghatározott csoportját alkotják a terjedési, ill. a fázissebességtől függő szórással és beilleszkednek a természeti ciklus-ritmus összefüggések rendszerébe (lásd SZÁDECZKY-KARDOSS ELEMÉR bevezető előadását).

IRODALOM

1. BERKES Z.: Az általános légkörzés éven belüli periódusai. *Geonómia és Bányászat*, **6**, 1–4, 13–30, 1973.
2. SZESZTAY, K.: *The Hydrosphere and the Climatic Changes*, to be Printed in No. 2. *Natural Resources Forum, United Nations, New York (1971)*. A Report of the Study of Man's Impact on Climate (SMIC) nyomán. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, and London, 96–98, 1971.
3. ODDONE, E.: Teoria della escillazione semidiurna di pressione. *La Meteorologia Pratica*, 77–83, 161–171, 1924. STEINER L.: A légnnyomás napi ingadozása, *Időjárás*, **29**, 110–113, 1925. nyomán.
4. RÓNA Zs.: Éghajlat, II. rész, K. M. Természettudományi Társulat, Budapest, 250–261, 1909.
5. WEICKMANN, L.: Das Wellenproblem der Atmosphäre. *Met. Zs.*, **44**, 241–253, 1927.
6. BÉLL B.: A légáramlás szerkezetének néhány jellemzője a tó (Balaton) északkeleti medencéjének légterében. *A Balaton Éghajlata. Az Országos Meteorológiai Szolgálat Hivatalos Kiadványa*, **XL**, 89–117, 1974.
7. LAUTERBACH, R.: *Physik des Planeten Erde*. Akademie-Verlag, Berlin, 1975.
8. BÉLL B.: A légkör általános cirkulációjának fizikai szemlélete. *Fizikai Szemle*, **XVIII**, 7, 1–7, 1968.
9. HRMOV, Sz. P.: *A szinoptikus meteorológia alapjai. Fordítás az 1948-ban (Gidrometeoizdat, Leningrad) megjelent eredetiről*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1952.
10. RAETHJEN, P.: *Dynamik der Zyklonen*. Akad. Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1953.
11. KOPPÁNY, Gy.: Estimation of the Life Span of Atmospheric Motion Systems by Means of Atmospheric Energetics. *Meteorological Magazine*, **104**, 302–306, 1975.
12. FIEDLER, F.—PANOFSKY, H. A.: Atmospheric Scales and Spectral Gaps. *Bulletin American Met. Soc.*, **51**, 12, 1114–1119, 1970.

