

A PLANETÁRIS CIRKULÁCIÓ PROBLÉMÁI A PALEOKLIMATOLÓGIÁBAN

Béll Béla
akad. lev. tag
Országos Meteorológiai Szolgálat

A földtudományok szintézisére törekvő geonómián belül fontos összekötő kapocs a meteorológia és a többi földtudomány között a paleoklimatológia. Az I. Anyag- és Energiaáramlási Ankét publikált anyagában (1) több részletet találunk az éghajlat és a földfelszín kölcsönhatásáról, többek között egy új kutatási irányzatnak: a klimatikus geomorfológiának célkitűzéseiről (Pécsi M.), az üledékes ciklusoknak a klímaingadozásokkal kimutatott kapcsolatáról (Szádeczky-Kardoss E.), az endogén jellegű hegységképződésnek a nagytérségű éghajlatra gyakorolt hatásáról (Szádeczky-Kardoss E.), s a paleoklimatológia centrális szerepéről a földtudományokban (Nagy L. -né).

Az I. ankétot 1969 novemberében a Magyar Meteorológiai Társaság és a Magyarhoni Földtani Társulat paleoklimatológiai tanácskozása követte, amely tudomásom szerint Magyarországon az első nagyobb szabású meteorológus-geológus találkozó volt. Az ankét és a tanácskozás fontosabb tanulságait a meteorológus szemléletével a következőkben foglalom össze.

A fejlődő paleoklimatológia olyan találkozó területe a földtudományoknak, amely az együttműködést és az interdiszciplináris kapcsolatokat nemcsak lehetővé teszi, hanem művelőtől meg is követeli. Alapvető feladata - a földtudományok fejlődéstörténeti szintézise a klimaváltozások rendszerében - teljes összhangban van a geonómia célkitűzéseivel, ennél fogva tipikusan geonómiai tudományterület.

A paleoklimatológia rövid, alig egy évszázados története során a feladatok természetszerűleg az adatgyűjtésre és az adatok meteorológiai értelmezésére váltak szét. Az első feladat körben a geológiai, geofizikai, morfológiai, geokémiai, növény- és állatélettani kutatások számos olyan földtörténeti anyagot tártak fel, amelyek - mint klímajelzők - a kutatott térségnek elsősorban hideg vagy meleg, száraz vagy nedves éghajlatára, sugárzási és szélviszonyaira engednek következtetni.

A klímajelzők a lokális éghajlat elemeit jellemzik. Annak a térségnek méreteit, amelyen belül a klímajelzők még reprezentatívnak tekinthetők, a meteorológiai értelmezés jelölheti meg, amennyiben a feltárt klímajelzőket be tudja illeszteni a Föld nagytérségű éghajlati rendszerébe.

A meteorológiai értelmezés felhasználhatja azt a tényt, hogy a globális éghajlati rendszere az időben változatlan fizikai törvények érvényesek, amelyek végeredményben a légkör sugárzás-, hő- és vízgazdálkodását, mozgási

folyamatait, azaz anyag- és energiaforgalmát foglalják össze az ún. dinamikus klimatológia keretében. Ezek a törvények a jelenben közvetlen meteorológiai mérésekkel tanulmányozhatók, és a múltra is visszavezethetők. (Voltaképpen az ún. "aktualizmus" közel 150 éves elvének alkalmazása ez a légkörre.)

A dinamikus klimatológia általános érvényű megállapításai közül felsorolunk néhányat, amelyek véleményem szerint a paleoklimatológiai adatok meteorológiai értelmezésénél nélkülözhetetlenek.

Az időjárást fenntartó energiaforrásoknak, a napsugárzásnak eltérő abszorpciója miatt a Föld-légkör rendszerben másodlagos hőforrások és hőnyelők alakulnak ki. Közöttük a hőcserét részben a földi szélrendszerek, az általános cirkuláció, részben a tengeráramlatok bonyolítják le. Ugyancsak az általános cirkuláció szállítja a légköri vízgőzt a forrásnak tekinthető párolgó vízfelszínekről a csapadékos zónák: a nyelők felé.

A cirkulációt fenntartó földi erők: a légnyomási gradiens-erő, a földforgásból származó Coriolis-erő, a gravitációs erő és a felszíni súrlódás a földtörténeti korszakokban változtak. A légköri energetika legfontosabb kérdései: a hő és a víz globális méretű kicserélődésének mechanizmusa, mozgástani problémája pedig a forgó Föld és a felszínnel súrlódó levegőburok közötti impulzusmomentum cseréje. A rendszer egyensúlya minden geológiai korszakban korlátok közé szorítja az általános cirkulációra s ezzel a Föld globális éghajlatára vonatkozó hipotéziseket. Így pl. egycellás, ún. direkt cirkuláció, amelyben a melegebb levegő felemelkedve a hőt a hidegebb terület felé szállítja, lenn pedig a hideg levegő ellentétes irányú áramlásával zárul - aminő a lassan forgó Vénusz légkörében elképzelhető - a forgó Földön nem alakulhat ki (a Coriolis-erő bizonyos méreteken túl a direkt cellát feloszlatja).

A hideg sarkvidéki és a meleg trópusi öv zonális nyomáseloszlást alakít ki, amely a Coriolis-erővel együtt a mérsékelt övben zonális, nyugat-keleti irányú légáramlást tart fenn. Az egész Föld felszínközeli rétegében egyirányú zonális szélrendszer nem maradhat fenn, mert a felszín és a légkör közötti momentumcsere előbb-utóbb megállítaná vagy felgyorsítaná a forgó Földet (a tapasztalat ennek ellentmond). Energetikai szükségyszerűség tehát az ellentétes irányú zonális áramgyűrűk jelenléte a Föld alsó légkörének cirkulációjában.

A zonális cirkuláció nem teszi lehetővé a meleg és a hideg övek között a hő kicserélődését, tartós fennmaradása a mérsékelt övben a szabad és a látens hőenergia felhalmozódására vezet.

A hideg és a meleg légtömegnek a gravitációs térben való felhalmozódása egyre növekvő potenciális energiával egyértelmű, amely végül is a zonális áramgyűrű turbulens háborgásaiban: a ciklontevékenységekben oldódik fel és alakul át mozgási energiává.

A földtudományok szintézisének lehetőségét igazolja a leírt légköri energiaátalakulás analógiája a földfelszín domborzati nagyformáinak kialakulásá-

ban. "A belső erők - írja Pécsi M. az I. ankét publikációjában - térben és szakaszosan váltakozó intenzivitással megnövelik a földfelszín relief-energiáját. Ezáltal adott helyen és időszakban az exogén hatóerők potenciális energiája megnövekszik, amely közvetlenül a gravitáció által vezetve fokozottabb anyagmozgatási tevékenységre készíti a felszínformáló külső folyamatokat". Számos példa arra mutat, hogy az energia ciklikus átalakulása a Föld-légkör rendszerben általános geonómiai törvényszerűség, amely az egyes közegekben a ciklusok időtartamában, a mozgó tömeg mennyiségében, a mozgó erők arányában különbözik ugyan, de a potenciális energia lassú felhalmozódása, majd gyors átváltódása ciklikusan megismétlődő jelenségek a Föld egészének történetében.

A mérsékelt égöv ciklonjaiban cserélődik ki végeredményben a meleg és a hideg éghajlati övek levegője, hő- és vízkészlete. A ciklonok a globális légkörzésnek a klasszikus felfogással szemben nem zavarai, hanem szerves (sőt a cirkulációt fenntartó) részei.

Az energia felhalmozódásának, ciklikus átváltódásának székhelye a mérsékelt égöv. Itt van lényegében a troposzférikus cirkuláció motorja, ellentétben a közel 3 évszázados felfogással, amely a napsütés energiájának mozgási energiává történő átalakulását a trópusi övben feltételezett direkt cirkulációban, a passzát-antipasszát szélrendszerben látta.

A mérsékelt öv cirkulációjában tehát a zonalitás labilis sajátja, a ciklust előbb-utóbb ún. lezáró anticiklon meridionális jellege fejezi be. A zonalitás egyúttal fokozódó ciklontevékenységet s ebben felszálló légmozgást jelent. A ciklontevékenységet lezáró anticiklon területén jóval lassúbb leszálló légmozgás alakul ki. A felszínről származó durvább és finomabb részecskék, a diszperz eloszlású aeroszol a termikus turbulencia és a ciklonok emelkedő légtömegeiben jutnak a magasba, és a ciklonok szélrendszerében helyeződnek át több száz és ezer kilométer távolságra. A szennyeződés szedimentációja - az egyik legfontosabb paleoklimatológiai éghajlatjelző - rendszerint az anticiklonok területén, a levegő lassú leszüremkedésével következik be. Mindezek a paleoklimatológiában közismertek, és a klímajelzők értékelésénél a következtetések gyakran alkalmazott láncszemei.

Az egyes földtörténeti korszakok cirkulációjának zonális, illetőleg meridionális jellegét természetesen a típusok nagyobb vagy kisebb gyakorisága, élettartama adja meg. Nem tisztázott az a kérdés, hogy egy-egy cirkulációs jelleg gyakoriságát milyen mértékben befolyásolhatják a földtörténet hosszabb-rövidebb időszakaiban aránylag kis energiájú s a felső légkörben jelentkező extraterresztrikus hatások - mint trigger-effektusok.

A földtörténeti kutatások során megállapított geofizikai és geokémiai változások: a föld pályaelemeinek, forgássebességének, az űslégkör összetételének, a szárazföldi és tengeri felszín arányának megváltozása, hegyrendszerek kiemelkedése, a kontinensvándorlás stb. megváltoztatták a légköri cirkuláció jellegét is. Ha a cirkulációt befolyásoló tényezőknek földtörténeti változásairól

geológiai, morfológiai stb. kutatásokra épülő megalapozott feltevéseink vannak, akkor a cirkulációról szerzett meteorológiai ismereteink birtokában a lokális megfigyelésekből általánosabb, végső fokon globális méretű következtéseket vonhatunk le.

Másrészt a változatos felszínű Földön, a különböző földrajzi zónákban, a változó összetételű magasabb légrétegekben, ahol a napsugárzás spektrális összetétele és intenzitása is különbözik a felszínközeli rétegek besugárzásától, egymástól alapvetően eltérő cirkulációs típusokat ismerhetünk meg. Ezeket a nehezen megközelíthető (trópusi, óceáni) vagy régebben elérhetetlen (magas légköri) térségeket a nemzetközi geofizikai együttműködés éveiben és azóta is közvetlen műszeres mérésekkel tanulmányozhatjuk. A megismert és ma is kutatott különböző cirkulációs típusok - energetikai hátterükkel - analóg jelenségei egyes földtörténeti korok éghajlati jellegzetességeinek. Hasonlóképpen felhasználható az analógia módszere paleoklimatológiai kutatásokra a bolygók légkörének összehasonlító tanulmányozása, az ún. összehasonlító planetológia útján. Az itt feltáruló lehetőségekre az I. anket két tanulmánya (Balázs, B. és Vinogradov A.P.) hívta fel a figyelmet. Ilyenformán a közvetett, indirekt paleoklimatológia mellett fokozatosan kifejlődik ennek a komplex geonómiai tudománynak direkt kutatási ága is.

A következőkben néhány példán szeretném bemutatni a földtörténeti korzakokban változó energetikai és cirkulációs tényezők jelenkori analógiáit.

Teoretikusan megalapozott feltevés szerint az őslégkör oxigéntartalma a vízgőz fotodisszociációja útján keletkezett. Az analóg légköri folyamat a magas légkörben ma is megfigyelhető. Az éjszakai égbolt fényének spektrális vizsgálata kimutatta, hogy 50 km fölött, főként 80 km körül az ultraibolya napfény hatására a légköri vízgőz disszociálódik, s a könnyű hidrogén a felső légkörbe, az oxigén az alacsonyabb rétegekbe távozik. Itt - 30 és 50 km között - az oxigénből ugyancsak fotodisszociáció útján keletkezett ozon abszorbeálja a disszociáló ultraibolya sugarakat. Ezért az oxigén itt megfigyelt keletkezése az alsóbb rétegekben, így a felszín közelében csak akkor mehetett végbe, amikor a légkörben oxigén még nem volt. A keletkezett oxigén és ozon a felszínre süllyedve a fotodisszociáció aktív szintjét mind magasabbra emelte, s a folyamat maradványa, Kaplan véleménye szerint (2), ma a mezoszféra és a termoszféra határán direkt mérésekkel is tanulmányozható.

Ugyancsak a jelenkorban tanulmányozható a széndioxid felhalmozódása és hőmérsékleti következménye - a légkör üvegházhatása - egyes bolygók (Vénusz, Mars) széndioxidban gazdag légkörében; a por, a diszperz aeroszol ülepedése a földi légkör kb. 3-5 km magas peploszférájában.

A cirkuláció erőterei közül a légnyomási gradienserő változásának cirkulációs következményei tanulmányozhatók széles skálában a bolygók légkörében (pl. a Vénusz felszínén a légnyomás 40-100 atm., a Marson $5 \cdot 10^{-3}$ atm). A Föld tengelykörüli forgássebességével változó Coriolis-erő a trópusokon ki-

kicsiny, ezért itt a cirkuláció inkább meridionális jellegű, a poláris zónában nagy (zonális cirkuláció). A felszíni sűrűlódás, amely rövidíti a ciklonok élet-tartamát, kedvez a meridionalitásnak, a kontinenseken nagy, az óceánokon kisebb. A tengerek és szárazföldek felszínének aránya - amely a földtörténet során változott - nagyon eltérő a jelenkor északi és déli félgömbjén. Emiatt jelentős aszimmetria figyelhető meg a két félgömb cirkulációjában, a ciklon-pályákban, a hő és a vízgőz forrásterületeinek elhelyezkedésében.

A hegységképződés klimatikus hatása jól tanulmányozható ugyanazon szélességi zónában fekvő egymásra nagyjából merőleges hegyvonulatoknak (Észak-Amerika meridionális és Európa zonális elhelyezkedésű hegyrendszerei) az áramlásban, ciklonképződésben, csapadékeloszlásban tapasztalt orografikus hatásain.

A hazai paleoklimatológiai irodalomban jelentős súllyal szerepelnek a földtörténeti újkorra, különösen a pleisztocén képződményekre vonatkozó kutatások (3). Ebben a földtörténeti korszakban a mai Magyarország térsége - földrajzi fekvése és felszíni formái miatt - a paleoklimatológiában éppen olyan fontos típust és határterületet képvisel, mint a jelenkor éghajlatában.

A negyedkor klímajelzőinek értékelésekor Magyarország térségének figyelembe veendő jellegzetességei:

a) Az európai oceanitás-kontinentalitás határzónájában fekszik. Ez a határzóna az egész troposzférában, kb. 10 km magasságig felfedezhető, tehát permanens sajátossága éghajlatunknak. Feltételezhető, hogy a negyedkorban az egyes szakaszok éghajlati jellegét az óceáni, a mediterrán és a kontinentális hatások valamelyikének túlnyomó gyakorisága határozta meg.

b) Éghajlatát zárt medencejellegűs a környező hegyek 2-3 km magasságig módosítják, az utóbbiak az advektív hidegektől megvédik, a kisugárzás okozta lehüléseknek kedveznek.

c) A nyugati szelek övének középső zónájában fekszik, nyáron az óceán felől érkező ciklonok útvonalában. Kontinentális teleken idáig nyúlik a Voieikof-féle magasnyomású kontinentális tengely, amely a ciklonpályákat részben északra, részben délre: a mediterrán térségbe tereli, a Kárpát-medencében pedig keleties szeleket, leszálló légáramlást, a por ülepedésére kedvező feltételeket alakít ki.

d) Az általános cirkuláció a felszín fölötti (kb. 1 km fölött) légrétegekben óceáni és mediterrán jellegű teleken melegíti, nyáron hűti a medence légtérét. Az évi advektív hőbevitel az elmúlt évtizedben abszolút értékben kicsiny, előjelében váltakozó volt (4).

A negyedkor paleoklimatológiájának legfontosabb kérdése a sarki jégtakaró kiterjedésének, visszahúzódásának folyamata, ami szoros kölcsönhatásban van az általános cirkuláció megváltozásával. Az ok és okozati összefüggések első láncszemét ma még nem ismerjük. Az extraterresztrikus effektusok kényszerítő feltételezése mellett fontolóra kell vennünk a légkör önszabályozá-

sát is, amely az egyirányú energiafelhalmozódás, ill. az energiaveszteség folyamatait aránylag kis térségeken belül is korlátozza belső mechanizmusával, és a szélsőségeket csökkentve az éghajlati rendszer egyensúlyának helyreállítására törekszik. A kérdést a dinamikus klimatológia nézőpontjából a következőképpen fogalmazhatjuk meg: hogyan módosíthatja a mérsékelt égöv nyugati szélrendszerét a sarki jégtakarónak a jégkorszakban kimutatott délre húzódása?

Predtecsenszkij (5) erre vonatkozó modelljében a mérsékelt öv a jégkorszakban a jelenleginél keskenyebb volt, minthogy északi határa a sarki jégtakaróval délebbre húzódott, déli határa pedig a magasnyomású övvel lényegében helyén maradt. Keskenyebb nyugati szélzónában nagyobb meridionális hőmérsékleti gradiensek alakulnak ki. Ennek következtében megerősödik a nyugati szél, és megélnkül a ciklontevékenység. Intenzívebbé válik a hőkiegyenlítés a meleg és a hideg égövek között, ami előbb-utóbb határt szab a jégtakaró terjeszkedésének.

Az I. ankét és a paleoklimatológiai tanácskozás számos hasonló kérdést vetett fel, amelyeknek megközelítése a földtudományok szakembereinek együttműködését, a meteorológia részéről a dinamikus klimatológia, a magaslégkörkutatás, a légköri energetika eredményeinek felhasználását kívánja a paleoklimatológiai adatok egységes éghajlati rendszerbe történő beillesztése érdekében.

IRODALOM

- (1) Az MTA Föld- és Bányászati Tudományok Osztályának Közleményei, 3, 1-3, 1970.
- (2) Faust, H.: Der Aufbau der Erdatmosphäre. Braunschweig, 1968.
- (3) Bogsch, L.: Überblick der paläoklimatologischen Forschung in Ungarn. Geol. Rundsch., 54, 356-363, 1964.
- (4) Béll, B.: Die Bedeutung des advektiven Wärmetransportes in der Energiebilanz des Luftraumes des Karpatenbeckens. Acta Climat., Szeged, VIII, 1-4, 3-31, 1969.
- (5) Blüthgen, J.: Allgemeine Klimageographie. 1964.