TELBISZ TAMÁS

Hidegben jobban nőnek a hegyek?

A címben feltett kérdés elsőre talán kissé furcsának hat, mégis komoly tudományos viták kereszttüzébe került, és egyértelmű válasz mindmáig nem született. Az elmúlt időszakban számos tudományos elképzelés, olykor meghökkentő hipotézis látott napvilágot a hegységképződések és az éghajlatváltozások kapcsolatáról, amelyek néha ellentmondanak egymásnak. Ezt az izgalmas kérdéskört mutatja be az alábbi cikk.

Fagyossá váló légkör

Az emberiség a földtörténetben ritka időszakban lépett a színpadra: egyáltalán nem természetes, hogy a sarkvidékeket jégtakaró borítja. Ehhez hasonló helyzet a szilárd vázas élőlények megjelenése óta (vagyis a *fanerozoikumban, amely* 585 millió éve kezdődött) mindössze háromszor (négyszer?) fordult elő: az ordoviciumban, a devonban (?), a karbon–perm határon és a harmadidőszak közepétől napjainkig.

A lehűlés legkorábban felismert bizonyítékait a jégtakaró és a hegyvidéki gleccserek által lerakott üledékek, valamint a növényzet és az állatvilág változásai jelentették. Az adatok gyarapodásával hamarosan kiderült, hogy a sarkvidéki jégtakaró kiterjedése nagymértékű, ritmikus változásokon ment keresztül az elmúlt 2 millió év során. Ezekről az kilengésekről mára bebizonyosodott, hogy a Föld Nap körüli pályájának ciklikus, néhány 10 000–100 000 éves ritmusú ingadozásai okozzák (forgástengely hajlásszöge, excentricitás, precesszió változásai). Egy kis bökkenő azonban akad: ezek a csillagászati okok ugyanígy hatnak több milliárd éve, a sarkvidéki jégtakaró létezését tehát nem indokolhatjuk ilyen módon. Egy hosszabb ideje tartó folyamatos lehűlésre kell magyarázatot találni, amelyet a csillagászati tényezők miatti eljegesedési és melegedési időszakok legfeljebb csak „cifráznak".

A hőmérséklet változásairól pontosabb képet az óceánok fenekéről nyerhetünk. Az ott lerakódó karbonátos kőzetekben megőrződik az óceánok vizének $^{18}O/^{16}O$ izotóparánya, amely a mindenkori hőmérsékletről tanúskodik (**1. ábra**). A könnyebb ^{16}O-izotóp nagyobb arányban párolog és épül be a sarkvidéki jégtakaróba, mint nehezebb társa, ezért hidegebb időszakokban, amikor a jégtakaró is nagyobb, megnövekszik a tengervíz $^{18}O/^{16}O$ izotóparánya. Ennek alapján megrajzolható a napjainkig tartó harmad-negyedidőszaki lehűlés története.

Mintegy 40–50 millió évvel ezelőtt a Föld éghajlata kiegyenlítettebb, melegebb és csapadékosabb volt, mint napjainkban, jégtakarónak nyoma sem volt. Ekkor kezdődött meg a máig tartó lehűlés. Az első jégtakaró a korai oligocén során (~36 millió éve) jelent meg az Antarktiszon, majd az $^{18}O/^{16}O$-görbe újabb törésének megfelelően mintegy 15 millió éve ismét terjeszkedett. A legújabb töréspontról viszont már az északi félteke tehet, ahol 3 millió éve indult hódító útjára a jégtakaró.

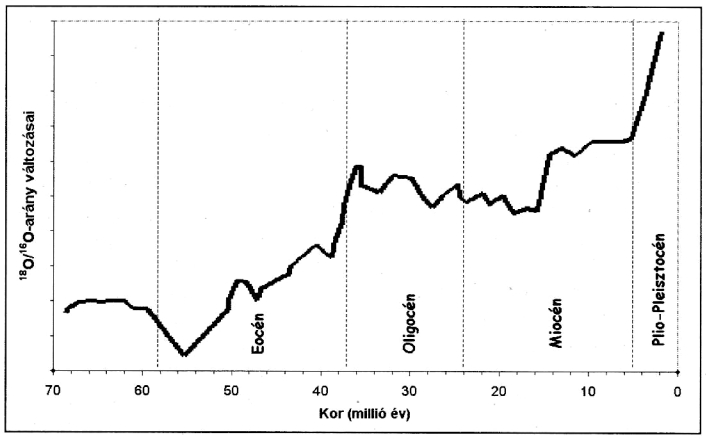
Nem elhanyagolható körülmény az sem, hogy a lehűlés nem egyformán jelentkezett a különböző földrajzi szélességeken: az Egyenlítő közelében alig néhány °C-os hőmérséklet-csökkenéssel számolhatunk, míg a sarkok felé közeledve 10–15 °C-os éghajlatromlás valószínűsíthető az elmúlt 40 millió év során.

Hol síkság volt, most kőhalom

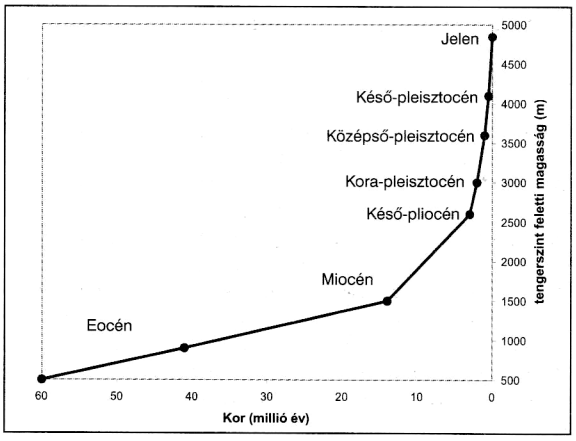
Az elmúlt 40 millió év azonban nem csak a klíma hűléséről nevezetes: a földtani, felszínalaktani, paleobotanikai kutatások szerint igen jelentős mértékű hegység-kiemelkedések történtek. Az indiai szubkontinens – Afrikáról leszakadva – észak felé „hajózott", míg kb. 45 millió éve neki nem ütközött Ázsiának. Az ütközéstől némiképp lendületét vesztette, de azóta újabb 2000 km-t tett meg észak felé, feltornyosítva a Tibeti-platót és a Himalája hegyláncait. Az emelkedés gyorsuló ütemét jelzi a **2. ábra**. Ezzel olyan méretű hegylánc (Himalája: 8000 m feletti csúcsokkal) és fennsík (Tibet: 5000 m-es átlagmagasság) jött létre, amely nemcsak ma számít a „világ tetejének", hanem valószínűleg az elmúlt 1 milliárd évben sem volt hozzá fogható kiemelkedés.

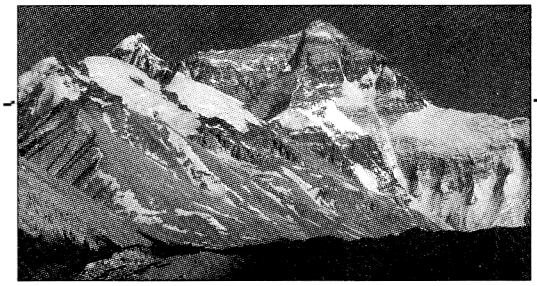
Szintén jelentős az Alpok kiemelkedése Európában az elmúlt 40 millió év során, különösen az utóbbi 3 millió évben, valamint Észak-Amerikában a Sierra Nevada-

1. ábra. Az elmúlt 70 millió év hőmérsékleti változásait jelző $^{18}O/^{16}O$-arány



2. ábra. A Tibeti-fennsík gyorsuló kiemelkedése paleobotanikai adatok alapján





A világ teteje, az Everest
(Szendrő Szabolcs felvétele)

hegység és a Colorado-fennsík felmagasodása is. Mivel 40 millió éve senki nem akadt, aki pontos domborzati térképeket készített volna, ezért elsősorban közvetett bizonyítékokra vagyunk utalva az emelkedés mértékét illetően. Milyen fortélyokkal lehet ezeket az emberi léptékkel lassú, „láthatatlan" emelkedéseket megmérni, megbecsülni?

Valóban „láthatatlanok"? Manapság, korszerű szintező műszerekkel lehetőség nyílik akár a milliméter törtrészének megfelelő mértékű éves emelkedések mérésére is. Ezt lehet – kellő óvatossággal – előrevetíteni hosszabb időszakokra is. Gyakoribb azonban olyan jelenségek megfigyelése, amik egy terület hosszabb ideig tartó emelkedéséről adnak átlagos képet. Számos felszínformáló folyamat működése szintekhez kötött: ilyen a tengerparti abráziós teraszok képződése, amelyet a világóceán mindenkori szintje határoz meg. A folyóvizek mentén kialakuló teraszok eredeti magasságának behatárolása már fogósabb kérdés, de bizonyos mértékig ez is használható az emelkedés meghatározásában csakúgy, mint egyes karsztos barlangok képződése, amelyeknek jellemző szintjeit a hegység karsztvízszintjének relatív elmozdulásai szabják meg. (Relatívon azt kell érteni, hogy a hegység kiemelkedése következtében éppúgy megnő a felszín és a karsztvízszint magasságkülönbsége, mintha a karsztvízszint süllyedése következne be. Mindkét eset *emeletes barlangok* képződéséhez vezet.)

Az emelkedés miatt nő a hegység helyzeti energiája, ami a folyóvölgyek gyorsuló bevágódását eredményezi, ez pedig meghatározza a lejtők alakját. A lejtők geometriai jellemzőiből következtethetünk a folyóvízi erózió jellegére, ebből pedig a hegység emelkedésére. A mélyen bevágódó és gyors vizek több hordalékot szállítanak ki a hegységből, amelyen belül nagyobb a durva szemcsés hordalék aránya. E jelenségek a folyók által lerakott üledékes környezetekben jól felismerhetők, és általában szintén az elmúlt 3 millió évben gyorsuló kiemelkedésről tanúskodnak.

Még markánsabban jelzik a tektonika szerepét azok a folyóvízi és vulkáni kőzetek a Sierra Nevada és a kaliforniai Központivölgy között, amelyek eredeti lerakódási síkjukhoz képest fokozódó mértékben kibillentek az emelkedő hegység és a süllyedő völgy határvonalán. A kibillenés mértékéből és korából az elmúlt 10 millió évre 2000 m-es kiemelkedés becsülhető, amelynek fele az utóbbi 3 millió évre esik.

Számos botanikai adat is az emelkedést támasztja alá: mai rokon fajok, illetve élettani jellegzetességek alapján meg lehet adni az egyes fajokhoz tartozó hőmérsékleti tartományokat, s ezekből a magassági zónára lehet következtetni. Ez alapján nyílik mód például annak becslésére, hány métert emelkedett a Tibeti-fennsík (*2. ábra*).

A tektonika az úr

Többek számára gyanússá vált az éghajlatváltozás és a tektonikus aktivitás korszakának egybeesése, így összefüggést kerestek a két jelenség között. Néhány már a múlt században világossá vált: a kiemelkedő magas hegygerincek akadályt képeznek az óceánoktól a szárazföld belseje felé haladó páradús légtömegek számára, így a hegységek szélirannyal szemközti oldala *(luv-oldal)* csapadékos lesz, míg a szélvédett *(lee-oldal)* szárazabbá válik. A kiemelkedés és a luv-oldal többletcsapadéka miatt egyre nagyobb a hótakaró kiterjedése, ami növeli a felszín fényvisszaverő-képességét, *albedóját*. Így kisebb lesz a felszín felmelegedése, ez újabb hűléshez vezet, és beindul egy pozitív visszacsatolás, aminek következtében a hegység egyre jobban eljegesedik. Ezeket a korai gondolatokat lesöpörték az asztalról, mondván, hatásuk csak lokális lehet, nem képesek az egész Földre kiterjedő éghajlatváltozást előidézni.

A lemeztektonika térhódításával új magyarázatok születtek a harmad-negyedidőszaki globális lehűlésre is. Egyik legjobban hangzó lehetőségnek az tűnt, hogy a kontinensek vándorlása során megváltozott az egyes földrajzi szélességeken a szárazföldek és az óceánok aránya: egyre több kontinens sodródott a sarkok felé, márpedig egy magas földrajzi szélességen található szárazföldön télen hosszan megmarad a hótakaró, ami eljegesedéshez vezethet. Valószínű tehát, hogy egy sarki kontinens kedvező helyzetet teremt a jégkorszakok kialakulásához. Mások arra gyanakodnak, hogy nem a sarkoknál, hanem a térítőknél levő szárazföldek aránya a fontosabb, mert ott a legtekintélyesebb a szárazföldek és az óceánok közti sugárzásbeli különbség. A kontinensek földtörténetből ismert mozgásai alapján ki is számították az egész Földre vonatkozó sugárzási egyenleget, amelynek két hangsúlyos minimuma van: a permo-karbon és harmad-negyedidőszaki eljegesedések idején. Hiába tetszetős ez az elmélet, sajnos kiderült, hogy csak hosszabb időléptékben okozhat változásokat, így a legutóbbi 40 millió év fokozatos lehűlését ezzel nem indokolhatjuk.

Nem ez volt az egyetlen, lemeztektonikához kötődő elmélet. Néhányan nagy jelentőséget tulajdonítanak az ún. „óceáni kapuk" nyílásának és záródásának: pl. a Földközi-tenger keleten való bezáródásának (23 millió éve) vagy a két Amerika panamai összeforrásának (3 millió éve). Ezek alapvetően átrendezhették a tengeráramlások rendszerét, amelyek az Egyenlítő és a sarkok közti hőkicserélésben játszanak fontos szerepet, módosíthatták a Föld éghajlatát. Ezek az elképzelések azonban még nincsenek kellően kidolgozva. Nem világos az a mechanizmus, amely a lehűlésért felelőssé tehető, így érdemes más jellegű összefüggéseket keresni a tektonika és az éghajlat kapcsolatában.

A számítógépek megjelenése alapvető változást hozott a légkör kutatásában. A Föld időjárási és éghajlati változásainak vizsgálatára *globális cirkulációs modellek (GCM)* születtek, amelyek különféle részletességgel és alapadatokkal, rengeteg egyenlet megoldásával próbálják a változásokat előrejelezni vagy a múltbelieket megmagyarázni. Ezek alapvetően a légkör hőmérséklet- és nyomásértékeivel számolnak, de ma már a világóceán és a szárazföldek különféle jellemzői is beépülnek a modellekbe. Eljött az ideje, hogy a korábbi elméleteket újra kipróbálják. Több helyzetet is elemeztek: az egyik modell során például leradírozták Tibetet és a Himaláját a térképről, így vizsgálták a Föld éghajlatát. Fény derült arra, hogy a Föld eme legmagasabb területe képes jelentősen megváltoztatni az általános légkörzést, hatása még a Földközi-tenger vidékén is érezhető, ha Tibet alacsonyabb volna, a Mediterráneum éghajlata nedvesebb lenne. (Mint ahogy volt is, sok millió éve, a botanikai leletek szerint.) A legalapvetőbb változást azonban az indiai monszun felerősödése jelenti. A Tibeti-fennsík nyári felmelegedése és erős téli lehűlése óriási nyomáskülönbségekhez vezet az Indiai-óceánhoz képest, ezért a monszunszelek erőssége megnő, és ezzel együtt a nyári esők mennyisége is. A Himalája déli lejtőin a sok csapadék miatt a hóhatár alacsonyabbra kúszik, és kezdődik ugyanaz a lemez... (albedo nő, felszín hűl, még több hó, gleccserek, albedo nő,...)

Az elmélet szószólói elismerik, hogy a magas fennsíkok puszta létezése az éghajlat elmúlt 40 millió éves lehűlésének csak egy részét képes megmagyarázni. Persze van még mit előhúzniuk a tarsolyból: előkerül a CO_2. A légköri CO_2 alapvetően a vulkánosság eredménye. Kétféle térség jellemezhető erős vulkáni tevékenységgel: az óceánközépi hátságok, és azok a kontinensperemek, ahol az óceáni kőzetlemez a szárazföldi alá bukik. Mindkét folyamat sebessége (tehát a vulkáni eredetű CO_2 mennyisége is) az óceánközépi hátságok szétsodródási ütemétől függ. Ez az utóbbi 40 millió évben nagyjából állandó volt, ettől tehát nem várhatunk ingadozásokat a légköri CO_2 tekintetében.

Az atmoszferikus CO_2 egyik fő fogyasztója a mállás: a szilikátos kőzetek mállása (kémiai lebontása) során a légkörből CO_2 kötődik meg, amely mészkő formájában raktározódik el. Kérdés, hogy a mállás mennyiségét mi határozza meg: a rendelkezésre álló CO_2 vagy a mállás egyéb feltételei? Nem triviális a kérdés, de szerencsére eldönthető: az első esetben ugyanis a légköri CO_2-szint párhuzamosan mozog a mállás mennyiségével, a másodikban viszont nem, mert ekkor a nagymértékű mállás fogyasztja a CO_2-ot, tehát éppen ellentétesen változnak. Szerencsére mindkét változót jól nyomozhatjuk az időben visszafelé haladva. Egyszer egy sarkkutatónak eszébe jutott, hogy meg kéne furkálni az antarktiszi és grönlandi több km vastag jégtakarókat. A jégminták sok légzárványt tartalmaztak, amelyekből a keletkezéskor jellemző CO_2-koncentráció rekonstruálható volt. A mállás mértékének meghatározásához az óceánfeneken lerakódott üledékek izotóptartalma nyújtott segítséget. A radiogén ^{87}Sr-izotóp elsősorban a szilikátok mállásával és lepusztulásával jut a tengerekbe, így a $^{87}Sr/^{86}Sr$-arány növekedéséből intenzív mállásra következtethetünk. A kétféle idősor összehasonlításából az az eredmény született, hogy a mállást nem a rendelkezésre álló CO_2, hanem a többi feltétel határozza meg. Melyek ezek?

Elsőként az a közelítés adódik, hogy a mállás mennyisége a szárazföldek területével arányos. Ez azonban félrevezető lehet, mert egy viszonylag sík területen a lepusztulás és a mállás kevésbé jelentős. Így arra gondolhatunk, hogy a szárazföldek domborzati tagoltsága felelős a mállásért: ahol nagyok a szintkülönbségek, gyors a lepusztulás folyamata is, mindig újabb kőzetek kerülnek felszínre, friss támadási felületet adna a mállás számára. További finomítást jelent a modellekben, hogy a felszíni lepusztulás is övezetes, akárcsak a különféle éghajlatok. Mivel a mállás kémiai folyamat, ezért a magasabb hőmérséklet és elsősorban a bőséges víz (csapadék) kedvező számára. Ebből szimulációs modellkísérletek alapján inkább a csapadék tűnik meghatározónak.

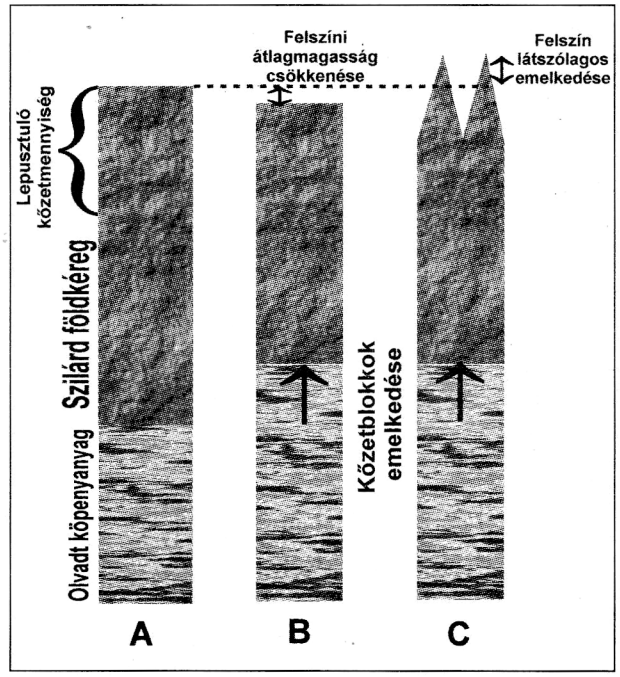
Most már összerakhatjuk a mozaikot: a hegységek harmad-negyedidőszaki kiemelkedése növelte a domborzati különbségeket, és sok helyen (mint például a Himalája déli oldalán az erősödő monszun miatt) a csapadékmennyiséget is, ezáltal a mállás egyre jelentősebbé vált, ami a légköri CO_2 fogyásához vezetett. Ez viszont csökkentette az üvegházhatást, és a globális klíma hűléséhez vezetett, ezt „hűtőházhatásnak" szokás nevezni. Ez a magyarázat nagyságrendileg is kielégítőnek tűnik a lehűlés mértékét tekintve. Jelentőségét jelzi az is, hogy ma az óceánokba érkező oldott hordalék (mállástermék) 25%-a a Himalájából és Tibetből származik, jóllehet ezek a felszínnek csak 5%-át teszik ki.

Még egy történeti érv áll a tektonikus okokat kereső tábor mellett: a Föld elmúlt 700 millió éves fejlődése során kétszer létezett Tibethez hasonló méretű magasföld (ha nem is egészen akkorák): a prekambrium, illetve a paleozoikum vége felé, és mindkétszer kapcsolódott hozzá eljegesedés. (Természetesen minél nagyobb az időtáv, annál bizonytalanabb a pontos kormeghatározás.)

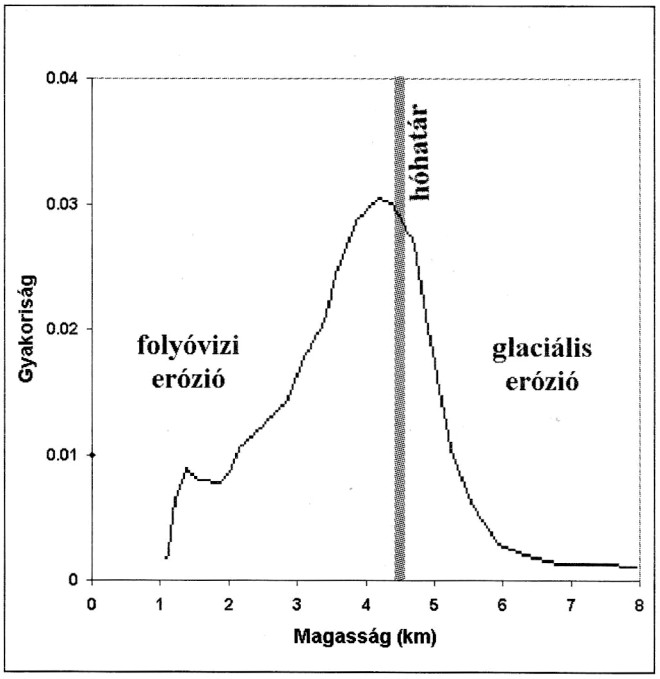
Klímapártiak

Az eddigi elképzelések bizonyos értelemben egybecsengenek a „normális" szemlélettel. A hegységek mozgását belülről „irányítják", azok pedig kiemelkedve némi hatást gyakorolnak az éghajlatra. Éppen ezért meglepetést keltett *Molnar és England* elképzelése, mely szerint a dolgok pontosan fordítva állnak, és a lehűlés felelős a hegységek kiemelkedéséért. Pedig az elméletük alapját képező jelenség már néhány évtizede ismert és bizonyított a geológusok körében: ez nem más, mint az *izosztázia*. Eszerint a földkéreg szilárd blokkjai Arkhimédesz törvényének megfelelően „úsznak" a köpeny olvadt, képlékeny kőzetanyagán. Vagyis magas hegységek alatt vastagabb a földkéreg, míg a medencék alatt kivékonyodik. Ha ennek a működésébe belegondolunk (**3. ábra**), akkor egyértelmű lesz, hogy ha a felszínről jelentős mennyiségű kőzet pusztul le, akkor a

3. ábra. Az izosztatikus emelkedés értelmezése. A: Eredeti állapot, amelyről a lepusztulás indul; B: Egyenletes lepusztulás esetén az elszállított kőzetanyag 1/6-ának megfelelő átlagmagasság-csökkenés valósul meg; C: A tagoltság növekedésével egyes gerincek magasodhatnak, miközben a felszín átlagmagassága ugyanúgy csökken.



4. ábra. Az ÉNy-Himalájára jellemző magasságeloszlási görbe



kőzetblokk felfelé mozog, és a ténylegesen elhordott kőzetanyag vastagságának csak 1/6-ával csökken a felszín átlagmagassága (a szilárd kőzetek és köpenyanyag közti sűrűségkülönbségnek megfelelően). Igen ám, de ha a lepusztulás nem egyenletesen történik (márpedig gyakran nem ez a helyzet, például mélyen bevágódó folyóvölgyek alakulnak ki), akkor a felszíni átlagmagasság csökkenése úgy is megvalósulhat, hogy közben a legmagasabb csúcsok, gerincek magassága növekszik (ezek csekélyebb mértékű lepusztulásába már kőzettani okok is belejátszhatnak).

Az új elmélet lényege tehát a következő: a lehűlés miatt a magashegységek egyre jobban eljegesedtek, de a glaciális erózió hatékonyabb, mint a folyóvízi (ez máig vitatott), így a lepusztulás felgyorsult. A közepes szélességeken az általános légkörzés változásai miatt a klíma szárazabbá, de viharosabbá vált, ami szintén a gyors eróziónak kedvezett. (A fokozódó szárazság a növénytakaró gyengüléséhez vezet, emiatt az időszakosan lezúduló heves esőzések nagyobb pusztítást végeznek, mintha az éghajlat csapadékosabb lenne.) A növekvő lepusztulás következtében a kőzetblokkok emelkedni kezdtek, és bár a felszín átlagmagassága csökkent, a csúcsok mégis egyre magasabbra törtek.

A klímapártiak szerint ideje, hogy rendet tegyünk az emelkedéssel kapcsolatos fogalmak között. Beszélhetünk ugyanis a felszín emelkedéséről, de a kőzettömeg emelkedéséről is, és e kettő nem egyezik meg; a felszín emelkedése egyenlő a kőzettömeg emelkedésével, csökkentve a lepusztulással. Az új teória képviselői az emelkedést *látszólagosnak* vélik, és érvelésüket arra alapozzák, hogy az emelkedés mellett felsorakoztatott bizonyítékok sokszor inkább a kőzettömeg emelkedését veszik figyelembe, és nem a felszín magasodását jelzik. Ez kétségkívül igaz a teraszokra és barlangi szintekre, amelyek a kőzetblokk mozgásához kötöttek, de a kibillenő kőzetrétegek is megmagyarázhatók izosztatikus emelkedéssel, miközben az átlagmagasság esetleg csökken. Ugyanakkor a Sierra Nevada-hegységre, e szerint az elmélet szerint 200 m-es átlagos felszíncsökkenés jellemző az elmúlt 10 millió évben anélkül, hogy a kőzetek több km-es emelkedését tagadnánk. Sőt, a csúcsok emelkedése is belefér az elképzelésbe, amit a mögöttes hegyközi medence szárazodása is valószínűsít: az esőárnyék létrejöttéhez elegendő, ha csak a hegység területének kis részére kiterjedő magas gerinc jön létre.

Az emelkedésre vonatkozó más bizonyítékok egyszerűen az éghajlatváltozás számlájára írhatók: például a növényzet hűvösebb klímához való alkalmazkodása nem az emelkedés, hanem a globális lehűlés miatt vált szükségessé. Ugyanígy a megnövekvő és durvább szemcsévé váló üledékek szintén megmagyarázhatók az éghajlatváltozás miatt megnövekvő glaciális és folyóvízi erózióval, nincs szükség tektonikus okok keresésére.

További fontos szempont, hogy a globális éghajlatváltozás egyidejűleg hat valamennyi hegység „látszólagos" emelkedésére, míg a lokális tektonikai folyamatok időbeli egybeesése további magyarázatot igényelne.

Egy másik klímapárti szerint a magashegységek eljegesedése bizonyos értelemben határt szab a kiemelkedésnek. A Himalája és a Karakorum egyes vidékeinek domborzati elemzése során kiderült, hogy a tengerszint feletti magasság gyakorisági görbéje hasonló jellegzetességeket mutat sok részterület esetében (**4. ábra**). A vizsgált területek 50%-át teszik ki a hóhatárnál nem sokkal alacsonyabb részek. Ebből arra következtettek, hogy amikor egy hegység növekedése során eléri a hóhatárt és gleccserek alakulnak ki, a lepusztulás annyira megnő, hogy a tektonikus emelkedés gyakorlatilag nem képes a felszínt tovább magasítani. Ezt jellemzi, hogy az itt tapasztalható lepusztulási rátákat 1 millió évre vetítve 5-10 km-es vastagságú anyag elhordásával számolhatunk. Ez esetben is csak a lepusztulásnak – elsősorban kőzettanilag – ellenálló csúcsok nyúlnak az „égig" (itt 8000 m fölé). Ezeket nevezik „topográfiai villámhárítóknak". A kiemelkedés domborzati értelmezésében tehát egyetértés van a klímatáborban, de a többi nem stimmel: ha ugyanis a gleccserekre fogjuk a tektonikus emelkedés „lefékezését", akkor a hóhatár felfelé mozgása, vagyis az éghajlat melegebb illetve szárazabb volta segíti elő a további emelkedést. Erre jó példa lehet Tibet, ahol a szárazság miatt nagyon magasan van a hóhatár, viszont tengerszint feletti átlagmagassága több mint a Himalájáé. Ha ez az elképzelés helytálló, az is következik belőle, hogy a magasabb szélességeken fekvő hegységek soha nem érhetik utol a Himalájáét (Tibetet), mivel a gleccserek megjelenése sokkal alacsonyabb tengerszint feletti magasságokban történik.

Is-is?

Kinek van igaza? Be kell vallanunk, hogy szélsőségesen megfogalmazott állításaiktól kicsit visszakoztak a klímapártiak. A lehűlés okára ugyanis ez az elmélet nem nyújt magyarázatot. Meghagyták tehát az elsődleges ok szerepét a tektonikusan gerjesztett kiemelkedésnek, de a kezdődő lehűléssel erősödik a lepusztulás, és beindul az izosztatikus emelkedés, ami a tektonikára ráépülve gyorsuló kőzetkiemelkedést (illetve gerincmagasságnövekedést), következésképpen fokozódó lehűlést hoz létre. Végeredményben tehát pozitív visszacsatolási hurok kezd működni. Ha ez így van, akkor nehezen eldönthető, hogy a kiemelkedés felelős a lehűlésért vagy fordítva.

Nagy Egyesített Elmélet a földrajzban

A földrajztudomány kialakulásától fogva (már a görögök is...) fontos, egységesítő szerepet töltött be. A tudás felhalmozódásával azonban a XIX. századtól kezdődően a társtudományok (geológia, meteorológia, kartográfia stb.) szép lassan különváltak. A szétválás utáni legkomolyabb (forradalmian új) szintézis, átfogó elmélet az 1960-as évek végétől diadalútjára induló *lemeztektonika* volt. Annyira szépen magyarázott meg temérdek jelenséget (hegységek elhelyezkedését, vulkáni öveket, földrengéses zónákat stb.), hogy mára egészen természetesnek tűnik, hozzánőtt a gondolkodásunkhoz.

A mai kutatások tükrében azonban úgy fest, hogy a lemeztektonika már nem eléggé átfogó: a tektonikus mozgások odavissza kölcsönhatásban vannak például az éghajlattal. Így egy teljes magyarázatra törekvő elméletnek (akár geológiai, akár meteorológiai célzattal készül) számításba kell venni a kőzetlemezeket, a légkört és a világóceánt is. Egy olyan új szintézis megalkotására van tehát szükség (és talán lehetőség), amely újra egybefogná a földtudomány berkeiben dolgozókat a kőzettanostól a földtörténészen, a geomorfológuson és meteorológuson keresztül az óceánkutatóig. A földi rendszerek egybekapcsolt modellje jelenthetné tehát a földrajz megszületésre váró Nagy Egyesített Elméletét.

IRODALOM

N. Brozovic – D. W. Burbank – A. J. Meigs, 1997: Climatic Limits on Landscape Development in the Northwestern Himalaya – Science, Vol 276, 571–574.

A. B. G. Bush, 2000: A positive climatic feedback mechanism for Himalayan glaciation – Quaternary International, Vol 65/66,3–13.

W. S. Broecker – G. H. Denton, 1990: What drives glacial cycles? – Scientific American, 1990 January, 42–51.

Dobosi, Z., 1984: Újabb irányzatok és eredmények az éghajlattanban – Földrajzi Közlemények, 33, 325–332.

P. Molnar – P. England, 1990: Late Cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change: chiken or egg? – Nature, Vol 346, 29–34.

N. Pinter – M. T. Brandon, 1997: How Erosion Builds Mountains – Scientific American, 1997 April, 60-65.

M. E. Raymo – W. F. Ruddiman, 1992: Tectonic forcing of late Cenozoic climate – Nature, Vol 359, 117–122.

W. F. Ruddiman – J. E. Kutzbach, 1991: Plateau uplift and climatic change – Scientific American, 1991 March, 42–49.

E. E. Small – R. S. Anderson, 1995: Geomorphically Driven Late Cenozoic Rock Uplift in the Sierra Nevada, California – Science, Vol 270, 277–280,

A. J. Weaver – M. Eby – A. F. Fanning – E. C. Wiebe, 1998: Simulated influence of carbon dioxide, orbital forcing and ice sheets on the climate of the Last Glacial Maximum – Nature, Vol 394, 847–853.

K. X. Whipple – E. Kirby – S. H. Brocklehurst, 1999: Geomorphic limits to climate-induced increases in topographic relief – Nature, Vol 401, 39–43.