

A jégkorszakok rejtélyei

Az utóbbi évtizedekben jelentős fejlődésen mentek keresztül a Föld múltbeli klímájának rekonstrukcióját végző tudományágak. Így viszonylag pontos képünk van bolygók mintegy 5 millió évet átölölő éghajlatáról, illetve az ezen időskálán domináló eljegesedésekről, az ún. glaciális-interglaciális oszcillációkról. Cikkünkben áttekintjük a klímát nagyban meghatározó oszcillációk egyszerűbb mechanizmusait, s rávilágítunk a magyarázatul szolgáló elméletek erőnyeire és problémáira.

A mindennapi életben komplexnek az átláthatatlant, a nehezen érthetőt nevezzük, s nincs ez másképp a tudományban sem. Az éjszakai égen vándorló bolygók mozgását bonyolultnak, misztikusnak tekintették évezredekken keresztül (olyannyira, hogy a mozgás megértésére tett erőfeszítések köré felépült egy, az emberek félelmére és hiszékenységére alapított szakma, az asztrológia). A jelenségek azonban egyszerűvé, érthetővé váltak, miután Kepler észrevette, hogy a bolygók pályái ellipszisek a Nap-centrikus leírásban, Newton pedig megmutatta, hogy az ellipszisek a gravitációs kölcsönhatásból következnek.

A klímatológia tudománya is komplex, misztikusnak tűnő dologgal foglalkozik; a Föld időjárásának több évtizedre (esetleg évszázadokra, évmilliókra) vonatkozó trendjeit próbálja felderíteni. Mivel az időjárás az embereket közvetlenül érinti, a hiányos megértés társadalmi vonzatai itt még súlyosabbak. Ismert például a középkorban egy több évszázados lehülési periódus (a kis jégkorszak, XIV–XIX. század), amelynek során a 0,5–1°C-os átlagos hőmérsékletsökkenés erősen visszavetette a mezőgazdasági termelést, így a mai Németország és Svájc bizonyos területein egy évtized alatt néha nyolcszor nem volt termés, s ez éhínségekhez vezetett [1]. A nehézségekre az emberek bűnbakot kerestek és találtak is: mindennaposá vált az időjárásért felelőssé tett boszorkányok elégetése.

Jelenleg a Föld felszínének átlaghőmérséklete mintegy 0,5–1°C-kal magasabb a 100–150 évvel ezelőtthez képest. A köznapi szóhasználatban ezt nevezzük globális felmelegedésnek. Kiváltó okként az üvegházhatású gázok, főként a szén-dioxid légköri koncentrációjának növekedését jelölik meg a klímamodellek nagyskalájú szimulációival foglalkozó kutatók. Az ipari forradalom óta az atmoszféra szén-dioxid-tartalma valóban mintegy 30%-kal emelkedett, s a növekedés egyik forrása az emberi tevékenység, ami persze felveti az emberek felelősségének (esetleg bűnösségének) kérdését. A teendők szükségessége, fontossági sorrendje és a terheket viselő körének meghatározása óhatatlanul politikai elemeket visz a kutatásokba, illetve az eredmények interpretációiba. Láthatóan itt is felbuknának egy gyorsan fejlődő, részben még kiforratlan tudomány nemkívánatos melléktermékei.

Az asztrológia és a boszorkányok példái óvatosságra intenek a klimatikus változások súlyosságának és okainak megítélésében. A Föld klímája visszacsatolásokból álló komplex rendszer, amelyben különböző időskálán ugyan, de minden összetevőnek (légkör, óceánok, kontinensek, jégmezők, bioszféra stb.) lényeges szerepe van. Azonban a komponensek alapvető fontosságú tulajdonságai, mint például a légkör esetén a felhőképződés, valamint a komponensek kölcsönhatásai a mai napig nem teljesen tisztázottak. Így a tudományos eredményekkel szembeni kötelező kételkedéssel kell kezelnünk a modellek szimulációiból következő eredményeket, így azt is, hogy az utóbbi évszázad változásait gyakorlatilag a klímarendszer egyetlen eleme okozta.

A következőkben az elméletek problémáit szeretnénk érzékelteni a hosszabb időskálán végbemenő klímaváltozások, a jégkorszakok modelljeinek vizsgálatával. Megmutatjuk, hogy a klíma-

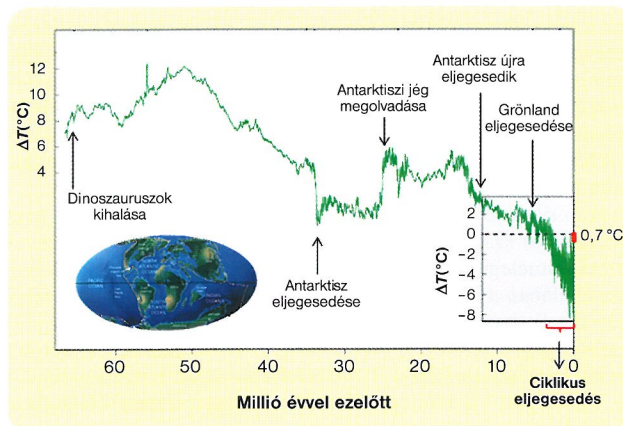
változások e dramatikus aspektusában, a ciklikusan megjelenő eljegesedésekben nem értjük sem a hőmérsékletváltozás nagyságát (8–10 °C), sem pedig a változások 100 ezer éves periódusát. Bár ezek a problémák nem tűnnek relevánsnak mindennapi időjárásunkban, a magyarázat hiánya azt jelenti, hogy a klímadinamika lényeges elemei hiányoznak az elméleti megfontolásokból, s ez megkérdőjelezi az éghajlati előrejelzések megalapozottságát.

Mit nevezünk jégkorszaknak?

A múltbeli hőmérséklet rekonstrukciója külön tudomány, amelynek részleteivel itt nem foglalkozunk. Fogadjuk el, hogy az antarktisi és grönlandi jégfuratokban, a mélytengeri üledékekben, valamint a geológiai kőzetformációkban mért izotópkoncentrációarányok [2] információt szolgáltatnak a Föld atmoszférájának hőmérséklet-változásairól, s e változásokat szeretnénk megérteni.

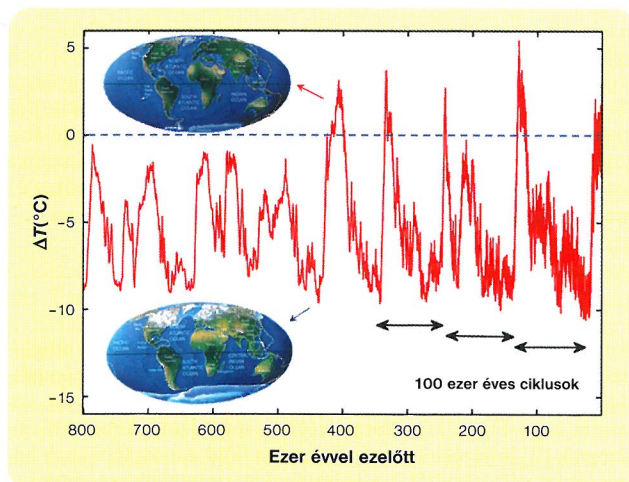
A jégkorszakot mint terminológiát a Föld történetének arra az időszakára használják, amikor valamelyik sarki területet jégtakaró fedi. Ebben az értelemben ma is jégkorszakban élünk, mely mintegy 35 millió éve kezdődött az Antarktisz eljegesedésével (1.

1. ábra. A Föld felszíni hőmérsékletének eltérése (ΔT) a szaggatott vonallal jelölt jelenkori értékhez képest, valamint a főbb klimatikus események az elmúlt 65 millió évben. A bal alsó sarokban a kontinensek 65 millió évvel ezelőtti elhelyezkedése látható. Fontos különbségek a jelenlegi helyzethez képest: Ausztrália még nem vált el az Antarktistól; India még úton van Ázsia felé, s ennek megfelelően még nincs Himalája; a közép-amerikai csatorna igen széles, s Európa nagy részét tenger fedi. A mélytengeri- és a jégfuratokból rekonstruált hőmérsékletek a jobb alsó sarokban kiemelt 12 millió éves időtartamra vonatkoznak. Az utóbbi 150 év hőmérséklet-emelkedésének nagyságát pedig a függőleges piros vonal mutatja



ábra). Bár a jégtakaró átmenetileg megolvadt, mégis a fenti időpontot tekintjük a „modernkori” jégkorszak kezdetének. Ekkor ugyanis a kontinensek részben átrendeződtek (az Antarktisz elvált a dél-amerikai és az ausztrál kontinenstől), megteremtve a lehetőségét az Antarktisz körülölelő hideg tengeráramlat kialakulásához, ami jelentősen csökkentette az Egyenlítő és a sarkvidék közötti hőáramlást [3,4] és idővel (az Antarktisz második eljegesedésekor) stabilizálta a jégmezőket. Az 1. ábrán szintén megfigyelhető, 15 millió éve tartó általános lehülési folyamatra nem ismert meggyőző magyarázat, minden valószínűség szerint a tengeráramlatok folyamatos átrendeződése okozza.

Hétköznapi értelemben, bár megtévesztő, de jégkorszaknak nevezük az utóbbi néhány millió évben ciklikusan bekövetkezett



2. ábra. A hőmérséklet változása az utolsó 800 ezer évben egy antarktisi jégfuratból rekonstruálva [5]. A nulla szintet itt az elmúlt 50 év átlaga adja (szaggatott kék vonal). Az ábra bal felső, ill. alsó sarkában a jégtakaró jellegzetes eloszlása látható a meleg (interglaciális), ill. a hideg (glaciális) időszakokban

erőteljes eljegesedéseket is. A jégkorszakon belül ciklikusan ismétlődő hidegebb (8–10°C-kal alacsonyabb hőmérséklet, kiterjedt jégtakaró) és melegebb (jelenlegi hőmérséklet, kisebb jégtakaró) időszakokat találunk (2. ábra), amiket glaciális-interglaciális oszcillációknak neveznek.

Eljegesedések az elmúlt 800 ezer évben

Az eljegesedések történetéről szóló legmegbízhatóbb információink a sarki jégmezőkből származnak [5]. Ahogy megyünk vissza felé az időben, az időmeghatározás egyre bizonytalanabbá válik, azonban a jégfuratok rétegeinek kormeghatározása az utolsó 800 ezer évre jónak mondható. Mivel a jégmagokból számolt hőmérséklet megegyezik más mérésekből, elsősorban a tengeri üledékekből kapott eredményekkel, a 2. ábra hőmérsékleti idősorára, mint magyarázatra váró kísérleti tényre tekinthetünk.

A 2. ábra jól mutatja, hogy az eljegesedéseket 100 ezer éves periódussal szakítják meg 10–20 ezer éves meleg időszakok. A gyors felmelegedéseket sokkal lassabb lehülési periódusok követik, általában a hőmérséklet menete fűrészfogszerű. A lehüléssel következő drasztikus eljegesedés mértékét jól jellemzi, hogy az utolsó eljegesedés mélypontján (nagyjából 22 ezer évvel ezelőtt), az óceánok szintje 120–130 méterrel alacsonyabb volt a mainál, s az elpárolgott víz mintegy 50 millió km²-nyi szárazföldi jégként volt jelen.

1. A földi klíma belső időskálái

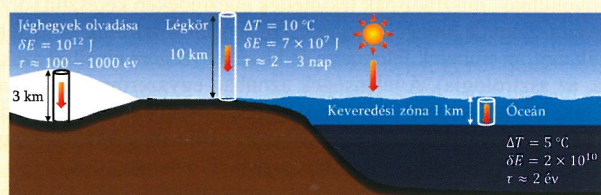
A 3. ábrán 1 m² keresztmetszetű, tipikus magasságú légköri, óceáni és jégmező állapotváltozásokra számoltuk ki a fenti megfontolásból következő időskálákat. A légkör esetén 10 km az a karakterisztikus magasság, ahol a meteorológiai folyamatok lejátszódnak, s a hőmérséklet jellegzetes változása egy front esetén $\Delta T \approx 10^\circ\text{C}$. Mivel ismerjük a levegőoszlop átlagos sűrűségét ($\rho \approx 0,7 \text{ kg/m}^3$) és fajhőjét ($C \approx 1000 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$), ezért az 1 m² keresztmetszetű oszlop energiaváltozását következőképp számíthatjuk:

$$\delta E = C \cdot \rho \cdot \Delta T \cdot 1 \text{ m}^2 \cdot 10 \text{ km} \approx 7 \cdot 10^7 \text{ J}$$

Mivel az 1 m²-re eső energiaáram $J_E = 342 \text{ J/s}$, a változások karakterisztikus idejére a következő becslést kapjuk:

$$\tau = \delta E / J_E \approx 2 \cdot 10^5 \text{ s} \approx 2-3 \text{ nap},$$

ami megfelel a szokásos meteorológiai változások időtartamának.



3. ábra. Jégmezők olvadásának, valamint jellegzetes légköri ($\Delta T \approx 10^\circ\text{C}$) és óceáni ($\Delta T \approx 5^\circ\text{C}$) állapotváltozások élettartama

A számolás hasonló az óceánra, csak a víz fajhőjét és sűrűségét kell behelyettesíteni a fenti formulákba, s a vízoszlop magasságaként a keveredési zóna magasságát kell használnunk. A jég esetén az olvadás igényli a legtöbb energiát, s az egysejnyi tömegre vonatkozó olvadáshő ($Q \approx 3 \cdot 10^5 \text{ J/kg}$) határozza meg a szükséges energiát ($\delta E = Q \cdot \rho \cdot 1 \text{ m}^2 \cdot 3 \text{ km} \approx 10^{12} \text{ J}$). Végül is a légkörre a ciklonok időskáláját, az óceánokra pedig a nagyobb örvények élettartamát kapjuk meg, ezek azonban nem összemérhetők a 100 ezer éves periódussal. A nagy jégmezők kialakulása és olvadása már hosszabb időszakot vesz igénybe ($\tau \approx 100$ év), különösen ha figyelembe vesszük a jégmezők nagyobb fényvisszaverő képességét (albedóját) és a napsugárzás kisebb beesési szögét magasabb szélességeken. De így is csak egy nagyságrendet tudunk növelni az időskálán, s a $\tau \approx 1000$ év a kívánt 100 ezer éves periódusnál még mindig két nagyságrenddel kisebb!

A 2. ábra magyarázatát keresve kézenfekvő a kérdés, hogy következh-e a 100 ezer éves periódus a légkör, az óceánok, vagy a jégmezők dinamikájából. Ennek megválaszolásához vizsgáljuk meg, hogy a klíma említett összetevőinek természetes változásai milyen időskálán mennek végbe (l. részletesebben az 1. blokkban). Induljunk ki abból, hogy minden változáshoz energiára (δE) van szükség, s a változás gyorsaságát, az energiát szállító energiaáram (J_E) nagysága határozza meg. A klíma esetében az energiaáram elsősorban a Naptól jön, s a Föld felszínére vett átlagban $J_E = 342 \text{ W/m}^2$. Tehát, ha a változáshoz (pl. jellegzetes hőmérsékletváltozáshoz) szükséges energiát egységnyi keresztmetszetű, tipikus magasságú lég-, víz-, vagy jégoszlopra számoljuk, akkor az energia-megmaradásból következik, hogy $\delta E = J_E \tau$, azaz a folyamat jellegzetes időskálája $\tau = \delta E / J_E$.

Az 1. blokkban kapott becslések arra utalnak, hogy az eljegesedések periódusát, legalábbis első közelítésben, nem a Föld éghajlati rendszerének belső oszcillációiban kell keresni. Természete-

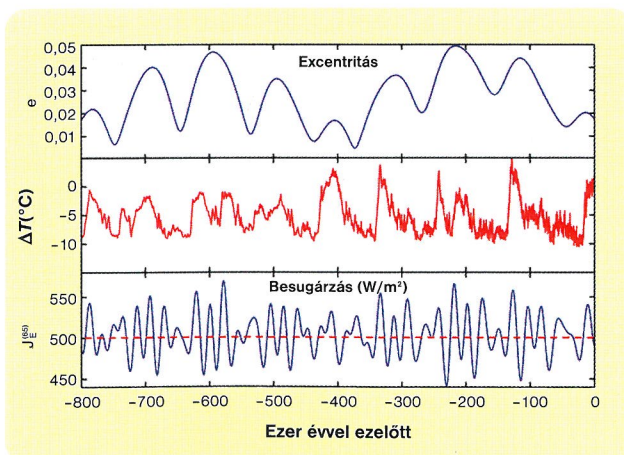
sen nem kizárt, hogy visszacsatolások sorozata révén kaphatunk 100 ezer éves periodicitású folyamatot, mint ahogy erre példát is mutatunk a későbbiekben, de egy ilyen időskálájú folyamat inkább külső okot sugall. A becslésekből az is látható, hogy a jégmezők dinamikája lassú, tehát bármi is legyen a külső ok, az valószínűleg a jégmezőkhöz csatolva fejti ki hatását.

A Milanković-elmélet

Külső ok sok minden lehet (a Nap tulajdonságainak változása, a Naprendszer mozgása a Tejút porfelhőin keresztül stb.), a 100 ezer éves periódus mindenestre csillagászati hátteret sejtet. Az első jelentős elmélet e területen Milanković [6] nevéhez fűződik, aki észrevette, hogy a Föld pályájának változásai befolyásolják a Napból jövő energiaáramot. Mivel főképp ez az áram hajítja a klímát, javaslatára szerint ez okozza annak változásait is. A 4. ábra legfelső görbéje a Föld pályájának excentricitását (a kör alaktól való eltérés jellemzőjét) mutatja. Feltűnő, hogy az excentricitás 100 ezer éves periódussal változik, s maximumai jó közelítéssel egybeesnek az antarktiszi jégfuratok hőmérsékleti maximumaival (4. ábra középső görbe). Ezt az egybeesést kombinálva a mechanikából ismert ténnyel, hogy a Napból érkező átlagos energiaáram nő a pálya excentricitásával, egy egyszerű elmélethez jutunk: a Földnek két jellegzetes klímaállapota van, s az eljegesedés állapotából a 100 ezer évente, az excentricitással együtt megnövekvő energiaáram visz át a magasabb hőmérsékletű állapotba.

Az excentricitáson alapuló elméletnek a 2. blokkban tárgyalt problémáin túl vannak egyéb nehézségei is (pl. a 100 ezer éves periódus mellett a 4. ábrán látható egy igen nagy amplitúdójú 400 ezer éves periódus is, aminek semmi jele sincs a hőmérsékleti adatokban), ezért Milanković is elvetette az eljegesedések ezt a magyarázatát. Kifinomultabb elmélete is csillagászati okokra, de nem a földpálya excentricitására vezeti vissza a 100 ezer éves periódust. Elméletének két alapfogalata közül az első könnyen érthető. Az eljegesedéseket a jégmezők mozgása határozza meg, s ebből következően a besugárzás J_E változásai a jégmezők határán lényegesek. A második gondolat is kézenfekvőnek tekinthető. Mivel a szárazföldök léte az északi féltekén megkönnyíti a jégmezők kiterjedését, ezért a ciklikus eljegesedést meghatározó folyamatok itt mennek végbe. E két feltételezésből következik, hogy a klímát meghatározó faktor a jéghatárok mozgási tartományában, a 60–70. északi szélességi fokon bejövő energiaáram, tehát ennek változá-

4. ábra. Az excentricitás (felső ábra) és az antarktiszi jégfuratból rekonstruált hőmérséklet (középső ábra), valamint a Föld pályaelemiből közelítően a jégmezők határán, a 65. északi szélességi fokon számított napi átlagos besugárzás június közepén (alsó ábra)



sait kell vizsgálnunk. Itt már lényeges szerepet játszanak olyan csillagászati faktorok is, mint a Föld forgástengelyének a pálya normálisától mért hajlásszöge (jelenleg 23,5°, egyébként 41 ezer éves periódussal billeg 22,1° és 24,5° között), valamint a forgástengely irányítottságának változása (a tengely 23 ezer év alatt ír le egy teljes fordulatot).

Vizsgáljuk tehát a 65. északi szélességi fokon érkező sugárzást (4. ábra alsó része), ami első ránézésre igen bonyolultnak tűnik. Az átlag körül nagyjából 10%-os fluktuációkat látunk a bejövő energiaáramban, ami előző számításaink alapján már tud 8–10°C-os hőmérsékletváltozást okozni. A besugárzás jelében azonban csak 41 és 23 ezer év periódusidejű komponensek láthatók (ami érthető, hiszen mind a forgástengely dőlésszöge, mind pedig a forgástengely irányítottsága erősen befolyásolja a magas szélességi fokon beérkező sugárzást). A jelben ott van a 100 ezer éves periódus is, de szabad szemmel nem látható, mivel az amplitúdója két nagyságrenddel kisebb, mint a másik két komponensé.

Most tehát a kérdés az, hogy a besugárzási jelből (4. ábra alsó része) hogyan lesz a megfigyelt hőmérsékleti jel (4. ábra, középső része). Természetes feltételezni, hogy erős besugárzás esetén a jégmező kiterjedése csökken, s a jégmezők visszavonulásával a hőmérséklet nő, s fordítva, kis besugárzás a jégmezők növekedésére és egyben a hőmérséklet csökkenésére vezet. A kétfajta visel-

2. Az excentricitáson alapuló elmélet kritikája

Sajnos a fenti elmélet magában hordja a komplex rendszerek magyarázatának egy gyakran előforduló problémáját. Hogy ezt megértsük, becsüljük meg elméletünkben az excentricitás okozta hőmérsékletnövekedést, ami a megfigyelések szerint 8–10°C (lásd a 2. ábrán). A Föld pályája közel kör, s az excentricitás maximális értéke kicsi $e \approx 0,05$ (lásd 4. ábra). A számítások szerint a Napból jövő energiaáram J_E változása, ΔJ_E az excentricitás négyzetével arányos ($\Delta J_E \approx e^2 J_E$), s a relatív változás nagyságrendje $\Delta J_E / J_E \approx e^2 \approx 10^{-3}$. Az okozott hőmérsékletváltozást megbecsülhetjük abból a feltételezésből, hogy a Föld abszolút hőmérsékletét (T_F) a bejövő és kimenő energiaáramok egyensúlya $J_E = J_F^k$ határozza meg, s a Föld fekete testként sugároz, azaz (a Stefan–Boltzmann-törvény szerint) a kimenő áram a hőmérséklet negyedik hatványával arányos, $J_F^k = aT_F^4$. Kis változások esetén a hőmérséklet megváltozását (ΔT_F) következőképpen írhatjuk:

$$\Delta J_E^k = a(T_F + \Delta T_F)^4 - aT_F^4 \approx 4aT_F^3 \Delta T_F = 4J_E^k \frac{\Delta T_F}{T_F},$$

s mivel $J_E = J_E^k$ és $\Delta J_E = \Delta J_E^k$, fentiekből következik, hogy az excentricitás okozta direkt hőmérsékletváltozás nagyságrendje:

$$\Delta T_F = \frac{T_F}{4} \frac{\Delta J_E^k}{J_E^k} = \frac{T_F}{4} \frac{\Delta J_E}{J_E} \approx 0,07^\circ C,$$

ahol a Föld jelenlegi hőmérsékletét $T_F = 15^\circ C = 288^\circ K$ -nek vettük. Látható, hogy a fenti becslés két nagyságrenddel kisebb a hideg és meleg időszakok közötti 8–10 °C-os hőmérsékletkülönbségénél, tehát az elmélet nem állja ki a tesztet. Ilyenkor szoktak arra hivatkozni, hogy a Föld egy komplex, nemlineáris rendszer, s a nemlineáris effektusok felerősíthetik az excentricitás oszcillációit két nagyságrenddel. Itt azonban látnunk kell azt a csapdát, amibe a lelkes kutatók gyakran belesnek. Az eljegesedések és az excentricitás változásai között észrevett korreláció nagyon szép, de egy elmélet alapjává tenni, majd a problémákat a szőnyeg alá söpörni az ismeretlen nemlinearitásokra hivatkozással veszélyes. Kívülállók számára ez ugyanis elfogadottá tehet olyan összefüggéseket, amelynek esetleg nincs semmi alapja.

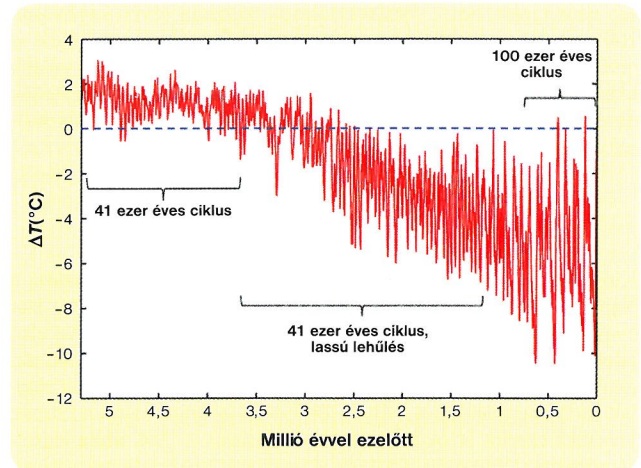
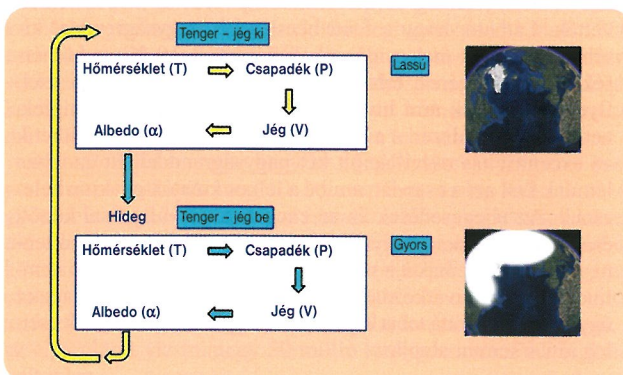
kedés a besugárzás kritikus értékénél, mondjuk 500 W/m^2 -nél változik (vízszintes szaggatott vonal a 4. ábra alsó részén). Ha még azt is feltételezzük, hogy a jégmezők növekedése, illetve csökkenése a besugárzás kritikus értékétől való eltéréseivel arányos, akkor el is érkezünk az eljegesedési elméletek következő nagy csoportjához [7].

A fenti gondolatokat egyenletekben megfogalmazva, s a kritikus $J_E^{(cs)}$ értékét megfelelően választva, megjelenik a megfigyelt hőmérsékleti jel 100 ezer éves periódusa. Sajnos azonban nagy amplitúdóval megmaradnak a 41 és 23 ezer éves periódusok is, s ettől a ponttól kezdve a versengő elméletek abban különböznek, hogyan szűrik ki az utóbbi periódusokat. Egy könnyen érthető megoldás arra épül [2], hogy a jégmező változásait nem a jég térfogatának pillanatnyi nagysága, hanem egy t_m időre visszamenőlegesen átlagolt értéke határozza meg. Az átlagolás a jégmezők t_m idejű memóriájának tekinthető, s e memória bevezetését motiválhatja a jégmezők lassú változása. Ha $t_m \approx 50\,000$ évet választunk (s az egyenletek néhány egyéb paramétereit is hangoljuk), akkor a 4. ábra középső részén az eljegesedések időskáláján túlmenően a felmelegedések ideje és nagysága is jó közelítéssel megkapható. Így az eredeti problémánk magyarázatát visszavezettük egy 50 ezer éves memória problémájának megfejtésére. Sajnos a bevezetett memória konkrét mechanizmusáról nincs elképzelés, s az 50 ezer éves érték sem értelmezhető fizikailag. Hasonló nehézségek merülnek fel minden olyan elméletben, amik főképp csillagászati okokra vezetnek vissza az eljegesedések menetét, tehát megoldatlan maradt a jégkorszakok rejtélye.

Alternatív elmélet: belső oszcillációk

A csillagászati magyarázatok nehézségei elvezettek a Föld klímarendszerének belső dinamikáján alapuló eljegesedési elméletek kidolgozásához. Emlékezzünk, a jégmezők belső dinamikájára az 1000 éves időskálát úgy kaptuk, hogy kiszámítottuk, mennyi idő alatt olvastja el a Nap a 3 km-es jégoszlopot. Ez az időskála nagyjából meg is felel a hidegből a melegbe átmenet időtartamának. Nem vizsgáltuk azonban a jégmezők növekedését, amit az atmoszféra és az óceánok globális áramlása határoz meg, ugyanis ez a cirkuláció szállítja a nedvességet a magasabb szélességi fokokra. A jégmezők kialakulásához szükséges időt megbecsülhetjük ab-

5. ábra. A ciklikus eljegesedések magyarázatául szolgáló alternatív mechanizmus vázlata. A nyílak az okból az okozat felé mutatnak, s a sárga nyílak növekedésre, a kékkek pedig csökkenésre utalnak. Például a felső dobozban a megemelkedő hőmérséklet a csapadék növekedésére, az pedig a jég mennyiségének növekedésére vezet, s ebből következően az albedo nő (mindenütt sárga nyílak). Az albedo növekedése viszont csökkenti a hőmérsékletet (kék nyíl) és átjutunk az eljegesedő állapotba (alsó doboz). A klímarendszernek a jobb oldali képeken ábrázolt két állapotát („lassú” lehűlés, ill. „gyors” felmelegedés) a tengeri jég léte vagy nemléte választja el



6. ábra. Mélytengeri üledékekből rekonstruált hőmérséklet-eltérés idősor az elmúlt öt millió évre. A nulla szintet itt az utolsó 100 év átlaga adja (szaggatott kék vonal). Látható, hogy az eljegesedések 41 ezer éves ciklusára egy lassú hűlési trend rakódik, s a 100 ezer éves ciklus 800 ezer évvel ezelőtt vált dominánssá

ból, hogy pl. Grönland északi részén 15 cm/év a csapadékmennyiség. Ebből következik, hogy egy 3 km magasságú jégtakaró felépítéséhez $20\text{--}30$ ezer év kell, s ha számolunk a jégmezők olvadásával is, akkor már közel járunk a gleccserek növekedési szakaszában mutatkozó $80\text{--}90$ ezer éves időtartamhoz.

Most tehát van két különböző időskálánk (1000 év és a $80\text{--}90$ ezer év), mely az éghajlati rendszer két fázisát, a hosszú ideig tartó lehűlést és a gyors felmelegedést jellemzi. A kérdés az, hogy mi kapcsolja át a klímát az egyik állapotból a másikba, honnan ered az oszcilláció? Az alábbiakban vázlatosan ismertetjük a legmeggyőzőbbnek tekinthető elméletet, az ún. tenger-jég kapcsoló elméletét [8].

Induljunk ki az éghajlati rendszer azon állapotából, amikor az északi féltekén a szárazföldi jégtakaró területe minimális, a tengerjég elolvadt (a napi sajtó ezt vizionálja a közeljövőre, az elméletben pedig ezt nevezik a *tenger-jég ki* állapotnak). Ekkor az albedo értéke minimális, a hőmérséklet maximális (5. ábra jobb felső része). A nyílt tengerek és a magasabb hőmérséklet északon intenzív párolgásra vezet, s jelentős mennyiségű csapadék jut a sarki területekre, s ennek nagy része hó formájában hullik a szárazföldekre. A gleccserek lassan gyarapodni kezdenek, a jégmezők megindulnak délre, s ennek fontos következménye van. A kiterjedő jégmezők ugyanis növelik az albedót, ami csökkenti a sugárzásbevitelt, ami pedig lehűlést indít el. A fent leírt *hőmérséklet magas* \rightarrow *csapadék nő* \rightarrow *jégmező nő* \rightarrow *albedo nő* \rightarrow *hőmérséklet csökken* folyamatot ábrázoltuk az 5. ábra felső, bekeretezett részében.

A jégmezők lassan terjednek ki, s ebből következően az albedo lassan nő, és az egész lehűlési folyamat nagyon lassú. A folyamat addig tart, amíg az északi tengerek felszíni hőmérséklete el nem eléri a fagyáspontot. Ekkor a lassú fázishoz képest igen gyorsan kiterjed a tengerek jégtakarója egészen az $50\text{--}60$. szélességi fokra, s létrejön a *tenger-jég be* állapot, ami indítja a felmelegedési folyamatot. Mivel hideg van és az északi tengerek befagytak, a jégmezők csapadék-utánpótlása elapad. A besugárzás miatt a jégmezők továbbra is olvadnak, de a csökkenő csapadék ezt nem tudja kompenzálni, s a jégthar elindul északra. Ez viszont csökkenti az albedóhoz, s a növekvő sugárzásbevitel miatt emelkedő hőmérséklethez vezet (5. ábra alsó bekeretezett része a fenti *hőmérséklet alacsony* \rightarrow *csapadék csökken* \rightarrow *jégmező fogy* \rightarrow *albedo csökken* \rightarrow *hőmérséklet nő* folyamatot ábrázolja).

Amikor a tengerfelszín hőmérséklete eléri az olvadáspontot, a tengerek jégtakarója rövid időn belül visszahúzódik a Jeges-tengerre, a száraz, hideg, eljegesedési időszak lezárul, majd további olvadással elérünk a *tenger-jég ki* kezdőállapotunkhoz, s a ciklus kezdődik előlről. Úgy tűnik, rátaláltunk a keresett mechanizmusra, mely nemcsak az eljegesedések oszcillációját, hanem a jelek fűrészfogszerű alakját is magyarázza a lehülés lassú és a felmelegedés gyors dinamikájával. Kérdés, hogy az elmélet megadja-e a ciklus 100 ezer éves hosszát. Itt jelentkezik a komplex rendszerek megértésének újabb jellegzetes problémája. Ha az említett mechanizmust egyenletek formájában írjuk le, akkor ezekben az egyenletekben annyi az ismeretlen, vagy a nagyon nehezen megbecsülhető paraméter, hogy bár a paraméterek hangolásával eljutunk a 100 ezer éves ciklushoz, azonban nem érezzük azt, hogy megoldottuk a jégkorszakok rejtélyét.

Maradtak persze egyéb megoldatlan problémák is a jégkorszakok időskálájával kapcsolatban. Például ismert, hogy a ciklikus eljegesedések jellegzetességei változtak az elmúlt ötmillió évben. A **6. ábrán** látható hőmérsékleti jel [9] az eddig tárgyalt 100 ezer éves periódust csak az utolsó 800 ezer évben mutatja. Azelőtt lehülési trend és egy gyorsabb, 41 ezer éves periódusú oszcilláció figyelhető meg (emlékezzünk, a Föld forgástengelyének billegése hasonló periodicitást mutat). Elmélet nincs, de világos, hogy a 41 és 100 ezer éves periódusú állapotok közti átmenet megértése fon-

tos lenne a jelenlegi klimatológiai dialógusokban. Egyben ez a feladat a klimatológia legszebb problémái közé tartozik. Megoldásához azonban valószínűleg túl kell lépünk a komplex rendszerek leírásának jelenlegi technikáin. ❁

A munka az OTKA NK100296 pályázat támogatásával készült.

IRODALOM

- [1] Behringer W., *Witchcraft Persecutions in Bavaria* (Cambridge University Press, 1997); *A klíma kultúrtörténete* (Corvina, 2010).
- [2] Berger, A. and Loutre, M. F., *Insolation values for the climate of the last 10 million years*. *Quaternary Sci. Rev.* **10**, 297–317, (1991); Berger, W. H., *The 100 kyr ice-age cycle: internal oscillations or inclinational forcing?* *Int. J. Earth Sciences* **88**, 305–316 (1999).
- [3] Diester-Haass, L. and Zahn, R., *Eocene-Oligocene transition in the Southern Ocean: History of water mass circulation and biological productivity*. *Geology*, **24**, 163–166 (1996).
- [4] Crowley, T. J. and North, G. R., *Paleoclimatology* (Oxford University Press, New York, 1991).
- [5] EPICA community members: *Eight glacial cycles from an Antarctic ice core*. *Nature* **429**, 623–628 (2004).
- [6] Milankovich, M., *Mathematische Klimalehre und Astronomische Theorie der Klimaschwanken*, *Handbuch der Klimatologie* (1930), Bd.1 Teil A.
- [7] Imbrie, J. et al., *On the structure and origin of major glaciation cycles: the 100 000 year cycle*, *Paleoceanography* **8**, 699–735 (1993).
- [8] Tziperman E. and Gildor H., *A sea-ice climate-switch mechanism for the 100 kyr glacial cycles*. *J. Geophys. Res.* **106**, 9117–9133 (2001).
- [9] Lisiecki, L. E. and Raymo, M. E., *A Pliocen-Pleistocene stack of globally distributed benthic records*. *Paleoceanography* **20**, PA1003 (2005).

A Kenai-félsziget jégmezője 300 négyzetmérföldnyi területet borít be Alaszkában

(Forrás: <http://www.alaskatourjobs.com/wp-content/uploads/2011/07/kenai-fjord-harding-icefield.jpg>)

