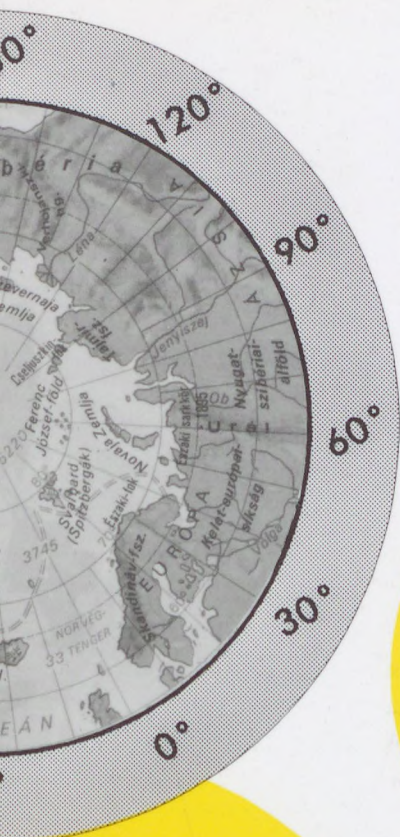


KOPPÁNY GYÖRGY
**LAKHATÓ
MARAD-E A FÖLD?**
A LÉGKÖR ÉS AZ ÉLŐVILÁG



AKADÉMIAI KIADÓ, BUDAPEST

LAKHATÓ MARAD-E
A FÖLD?

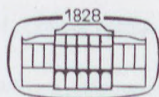
26 961

KOPPÁNY GYÖRGY

LAKHATÓ MARAD-E A FÖLD?

A LÉGKÖR ÉS AZ ÉLŐVILÁG

MTAK



AKADÉMIAI KIADÓ, BUDAPEST

508580

MAGYAR
TUDOMÁNYOS AKADEMIA
KÖNYVTÁRA

ISBN 963 05 6588 9

Kiadja az Akadémiai Kiadó
1117 Budapest, Prielle Kornélia u. 19-35.

© Koppány György, 1993

Minden jog fenntartva, beleértve a sokszorosítás, a nyilvános előadás, a rádió- és televízióadás,
valamint a fordítás jogát, az egyes fejezeteket illetően is.

Printed in Hungary

M. TUD. AKADEMIA KÖNYVTÁRA
Könyvtár 155/19 34 sz.

TARTALOMJEGYZÉK

1. Félelem a kozmikus katasztrófáktól	7
2. A népességrobbanás következményei.....	14
2.1. A világ népességének változása	14
2.2. A nomád népektől a civilizált társadalmakig.....	16
2.3. Energiaéhség a 20. század végén	19
2.4. Élelmiszer gondok	23
3. Világméretű légkörkutató	26
3.1. A kezdet kezdete.....	26
3.2. Időjárási Világszolgálat.....	29
3.3. Globális légkörkutató program.....	35
3.4. Éghajlati világprogram	40
4. Globális éghajlati rendszer	43
5. Az éghajlat-ingadozások antropogén okai	48
5.1. A légkör összetétele.....	48
5.2. Az élet megjelenése a Földön	52
5.3. Az emberi tevékenység és a légkör.....	57
6. Nemzetközi egyezmények a légkör védelmére és az éghajlat stabilizálására	68
6.1. A modern ember és az ősi keleti bölcsesség.....	68
6.2. Számvetés a légköri gázokkal.....	69
6.3. Nemzetközi egyezmények a levegőtisztaság és a légkör védelmére.....	72
7. Önszabályozó mechanizmusok a Földön. Gaia.....	75
7.1. A Föld a világűrben nézve	75
7.2. A Viking-program	84
7.3. A Gaia-hipotézis	88
8. Mitől függ a jövő éghajlata?.....	96
8.1. Az előrejelezhetőség határai	96

8.2. Az éghajlat múltjának tanúságai.....	100
8.3. Az Antarktisz és Grönland jégtakarója	105
8.4. Bizonyosságok és bizonytalanságok.....	109
Köszönetnyilvánítás.....	114
Irodalom.....	115
Tárgymutató	118

1. FÉLELEM A KOZMIKUS KATASZTRÓFÁKTÓL

„S felelted-é már a tudós szavát,
Ki felmérte, hogy négy ezredévre
Világod megfagy, – s a küzdés eláll?”
(Madách: Az ember tragédiája, XIII. szfn)

Madách Imre névtelen tudósa 4000 évet adott arra, hogy az életet fenntartó Nap kihűl, a Föld megfagy. A XIV. színben az emberiség jövőjét megálmodó Ádám még az egyenlítőn is kietlen jégmezőt és néhány nyomorúságban tengődő eszkimót talál. Vajon milyen számítás lehetett az alapja annak, hogy Napunk élettartama ilyen rövidnek adódott?

Tegyük fel, hogy a múlt század közepén élt tudós jó közelítéssel kiszámította, mennyi hőt sugároz ki évente a Nap. Mai ismereteink szerint ez mintegy $1,4 \cdot 10^{34}$ joule/év. De vajon mi lehet az a tüzelőanyag, amely folyamatosan ennyi energiát képes szolgáltatni? Az 1800-as évek első felében legjobb fűtőanyagnak a feketeszenet, az antracitot tartották. Egy kilogramm szén elégetésekor 30 MJ (30 megajoule, azaz 30 millió joule) hő szabadul fel. A Nap tömege $1,98 \cdot 10^{30}$ kilogramm. Ha a Nap egész tömege feketeszenből állna, akkor – induláskor – $59,4 \cdot 10^{36}$ joule energia-készlettel rendelkezne. Ha ebből *évente folyamatosan* $1,4 \cdot 10^{34}$ joule hőenergiát használna fel a feketeszen elégetésével, akkor egyszerű osztással kiszámítható a Nap élettartama, és ez 4243 évnek adódna. Ez egészen jól megegyezik Madách tudósának a számításával. Egy kőszénből álló Nap változatlan hőtermeléssel kerekén 4000 év alatt elfogyasztaná tüzelőanyagát. A kőszén elégetéséhez természetesen oxigénre is szükség lenne, emiatt vagy a Nap tömegét kellene jelentősen nagyobbak föltételezni, vagy a Napban elégő kőszén tömegét kisebbnek venni.

Nem róhatjuk fel a múlt század közepén élt tudósaknak, hogy nem ismerte a hidrogén–hélium fúziót, amely mai tudásunk szerint a Nap igazi fűtőanyaga. Madách kortársa semmiképpen sem tudhatta, hogy a Napban végbemenő fúziós folyamatok során másodpercenként 657 millió tonna hidrogénből 653 millió tonna hélium keletkezik, vagyis másodpercenként 4 millió tonnányi tömeg sugárzás formájában a világűrbe távozik. Ez naponta $3,45 \cdot 10^{11}$ tonna, *évente* $1,26 \cdot 10^{14}$ tonna tömegvesztéssel *jelent*. A Nap egész tömege, mint fentebb említettük $1,98 \cdot 10^{30}$ kilogramm, azaz $1,98 \cdot 10^{27}$ tonna. Tíz milliárd év alatt a Nap tömegvesztése $1,26 \cdot 10^{24}$ tonna, vagyis egész tömegének alig egy ezreléke.

Megnyugtató lehet számunkra, hogy belátható ideig van elegendő tüzelőanyag a Napban, nem kell tartanunk a világ megfagyásától, az eszkimójelenet rémképétől.

Kozmikus események azonban más formában is aggodalomra, félelemre adtak

okot. Csillagászok kiszámították, hogy az Edmund Halley által 1682-ben fölfedezett és róla elnevezett üstökös 1910. május 19-én hajnalban annyira megközelíti a Földet, hogy a Föld keresztülhalad az üstökös csóváján. A korabeli lapok bőségesen foglalkoztak e rendkívüli jelenség ismertetésével, valamint az emberek reagálásával az üstökössel való találkozás hírére.

Érdeemes idézni az 1910-ben megjelent újságcikkekből. A *Magyar Nemzet* 1910. április 21-i számában röviden beszámol Konkoly-Thege Miklósnak, a híres magyar csillagásznak és az Országos Meteorológiai Intézet akkori igazgatójának a Krisztinavárosi Kaszinóban tartott előadásáról, amelyben foglalkozott „a nemsokára elkövetkezendő Halley-üstökössel”. A *Szegedi Napló* 1910. április 24-én ad hírt a nevezetes eseményről „Jön az üstökös” címmel. Ugyancsak a *Szegedi Napló* írja 1910. május 19-én: „Itt az üstökös! A félelmetes Halley csóvájában: Három csillagász ma jelentést adott ki..., hogy a Föld holnap, csütörtökön kora reggel átmegy a Halley-üstökös csóváján. Ekkor beteljesedik Petőfi mondása: a Föld forog keserű levében...,* ami azonban nem olyan keserű, bár kéksav van benne, hogy árthatna az emberiségnek.”. „Konstantinápoly: A török lakosság rendkívül aggódik a Halley-féle üstökös megjelenése miatt.” „New Yorkban és Párizsban a lakosság egy része összevásárolta az oxigén készletet, hogy azzal védekezzen – ha jön a Halley – az üstökös farkában lévő állítólagos mérges gázok ellen.” „Budapesten ma éjszaka valóságos zarándoklás volt a Gellért-hegyre, ahol várták az üstököst.”

Magyar Nemzet 1910. május 19.: „Szinte hihetetlen, mégis igaz, hogy egyes vegyészeti gyárak, amelyek oxigént állítanak elő, pompás üzleteket csinálnak az üstökössel, mert azért akadnak Párizsban is babonás és tehetős emberek, akik elhiszik, hogy a Halley csóvája megmérgezi a Föld levegőjét, s jó lesz idejekorán levegőről gondoskodni. De a legeslegjobb üzletet a jósnők és a kártyavetőnők csinálják, kiknek szüret az üstökös megjelenése.” „Chicagóból jött a hír, hogy a polgárostály is babonás félelemmel töltötte az éjszakát. Ajtókat, ablakokat jól bezárták és még a kulcslyukakat is betömtek.”

A *Szegedi Napló* írja 1910. május 19-én: „Az égi esemény után. Nem pusztult el a világ.” „A tudósok elmondották, hogy nincs mitől tartani, az üstökösnek nem lesz semmi káros hatása.” Majd május 20-án: „Semmiféle égi tűnemény, elektromos és mágneses hatás nem mutatkozott, s úgy látszott, hogy a csóván észrevétlenül mentünk keresztül.” Május 22-én: „Heidelberg: A csillagvizsgáló intézet szerint a föld május 19-én reggel négy óra 30 perc körül valóban keresztülment az üstökös csóváján. A léghajókon gyűjtött levegőt megvizsgálták és megállapították, hogy nagyon sok ként tartalmaz.”

A korabeli híradásokból tehát kiderül, hogy ezúttal nem az üstökös pusztá látványa keltett félelmet, hanem az a hiedelem, hogy az üstökös csóvájában kéksav, azaz cian-hidrogén van, és ez belekerül a légkörbe. Ez pedig valóban nagyon erős mérge.

*Az újságíró itt valószínűleg Vörösmarty Mihály „Vén cigány” c. versére utal, és így tévesen hivatkozik Petőfire. (A szerző)

Ezzel szemben a levegő vizsgálatából csak az derült ki, hogy sok kén tartalmaz. A cián-hidrogén, HCN kémiai elemei között nem szerepel a kén. De nem valószínű, hogy a levegőben állítólag talált több kén az üstökös csóváján történt áthaladással állt volna kapcsolatban.

Csalódást okozott az éjszakát átvirrasztó és az eget kémlelő tömegekben az is, hogy a nevezetes hajnalon semmit sem láttak az üstökösből. Ez érthető is, hiszen abban az órában, amikor a Föld éppen áthaladt a csóván, az üstökös feje a Nap irányában volt, tehát a Nap fénye miatt nem is volt látható. Az üstökös feje a számítások szerint ekkor mindössze 20 millió kilométerre lehetett a Földtől.

Érdemes talán megemlíteni, hogy a Halley-üstökös 76 évenként visszatér, így 1986-ban ismét látható volt a Földről. Ez a találkozás azonban semmilyen félelmet nem okozott, hiszen sokkal nagyobb távolságban volt az üstökös, mint az 1910-es találkozáskor, és még a számítottnál is jóval halványabbnak látszott.

1962 elején azonban újabb hírt lehetett hallani, olvasni a világ vége közeledtéről. A világ végének még a dátumát is pontosan megadták: február 5. Ismét az égen kellett keresnünk azt a jelenséget, ami okot szolgáltathatott a világvége várására. Valóban: 1962. február elején a Merkúr, Vénusz, Mars, Jupiter és Szaturnusz alig 15 foknyi látószögön belül „egy vonalba” kerültek az égen, míg a harmadik óriás bolygó, az Uránusz az égnek csaknem pontosan az átelles oldalán volt található. Az elsőként említett öt bolygó tehát együttállásban volt egymással, míg az Uránusz oppozícióba került az előbbiekkal. Az ilyen együttállás ritka, de nem egyedülálló jelenség a naprendszerben. A három óriásbolygó: a Jupiter, Szaturnusz és Uránusz például kerekén 180 évenként kerül csaknem egy vonalba, ha tehát ehhez kötnénk a világvége időpontját, 180 évenként kellene bekövetkeznie.

Hasonló példákat hosszan lehetne sorolni, amelyeknek közös vonása valamilyen félelem egy kozmikus katasztrófától. Nem célunk annak felderítése, hogy milyen lélektani, kulturális, társadalmi gyökerei lehetnek a gyakran vissza-visszatérő világvége-várásnak. Nehéz volna ugyanis szétválasztani a bibliai végítélet várását az emberben a vallástól függetlenül élő babonás félelmektől, a szenzációkereséstől és a mindenből jó üzletet csináló nyerészkedési vágytól. Nyilvánvalón ezek mindegyike kisebb-nagyobb mértékben hozzájárulhat ahhoz, hogy az emberek jelentős része hittelt ad a globális pusztulásról szóló jóslatoknak.

Vannak azonban kézzelfogható okai is a természeti katasztrófáktól való félelmeknek: ezek a nagyon is gyakori, de különböző formában jelentkező természeti csapások. Szinte hihetetlen, de számos történelmi följegyzés tanúsítja, hogy Európában a középkorban a szélsőséges időjárási kilengések (rendkívül zord telek, árvizek, aszályok) akkora éhínséget okoztak, hogy az éhségtől gyötört emberek emberhúst ettek. Néhány európai példa az emberhúsevésre: Németország, Olaszország 850/51, Magyarország 1233, 1312, Szepesség 1312, Magyarország 1505, Erdély 1534, 1535, Debrecen 1585, Erdély 1602, 1604 (RÉTHLY 1962). A természeti csapások közé tartozott a középkori Magyarországon a sáskajárás, továbbá egészen a 19. századig a pestis, kolera és más járványok is. Mindezen csapásokkal szemben az ember védte-

lennek és kiszolgáltatottnak érezte magát. S bár a védekezésnek számos eszközét sikerrel alkalmazza a mai kor embere, mégsem érezheti teljes biztonságban magát pl. egy földrengéssel, egy szökőárral, egy tornádóval, tájfunnal, hurrikánnal szemben. Gondoljunk csak az 1991-ben Bangladeszt sújtó, becslések szerint egy millió emberéletet kioltó áradásra, amit egy trópusi ciklon okozott. Igaz, hogy ezek a természeti csapások lokálisak, nem terjednek ki egy egész kontinensre, vagy éppenséggel az egész világra. De hogy ott, ahol éppen vagyunk, mikor és milyen természeti katasztrófa következik be, azt senki sem tudhatja előre.

S ha a természet meg is kímél bennünket valamilyen pusztulástól, maga az ember talál ki szörnyű eszközöket önmaga tömeges elpusztítására. A nukleáris és a vegyi fegyverek hatása olyan borzalmas, hogy még a támadó is visszaretten olykor a bevetésüktől, mert maga is fél az ellencsapástól. A hidegháború éveiben, amikor a szuperhatalmak egymással versengve fejlesztették ki egyre szörnyűbb arsenáljaikat, nem minden alap nélkül terjedt Európában és Észak-Amerikában a hisztérikus félelem egy esetleges nukleáris háborútól.

Ám sietve lapozzunk tovább a történelemben abban a reményben, hogy egy III. világháború veszélye távozóban van tőlünk. Sajnos enélkül is marad félnivalónk. És úgy vélem, itt meg kell állnom egy kis időre, hogy világosan megfogalmazzam: mit akarok és mit nem, ezzel az írással. Nem akarok hiábavaló félelmet kelteni az olvasóban, semmiképpen sem akarom fokozni az egyébként is állandóan bennünk lappangó rettegést az ismeretlen veszélyektől: Ellenben, amennyire ez egyáltalán lehetséges, *szét akarom választani a reális veszélyeket a képzeletszülte katasztrófáktól való rettegéstől.* Célom annak lelkiismeretes tisztázása, hogy melyek azok a reális veszélyek, amelyek ellen semmit sem tehetünk, és melyek azok, amelyek ellen tudunk, és kell is védekeznünk. Ide kívánczik egy több nyelven is elterjedt rövid fohász: „God, grant me the serenity to accept the things I can not change; the courage to change the things I can; and the wisdom to know the difference. Amen.” („Uram adj kellő derűs nyugalmat, hogy elfogadjam a dolgokat, amelyeket nem tudok megváltoztatni; bátorságot, hogy megváltoztassam azt, amit képes vagyok, és bölcsességet, hogy a kettőt meg tudjam különböztetni. Ámen.”)

A 20. század embere is fél a jövőtől, aggódik az ismeretlen veszélyek, a titokzatos erők miatt. A már említett hidegháborús időszakban reális veszély volt a nukleáris háború. Az atomcsend egyezmény megkötéséig (1963. VIII. 5.) a szuperhatalmak rendszeresen végeztek kísérleti robbantásokat a légkörben. Az atom- és hidrogénbombák robbantásakor radioaktív anyagok kerültek a légkörbe, ezeket a légáramlások nagy távolságokra szállították. Az esővízzel bekerültek, a talajba, a növényekbe, a táplálékba. A környezet radioaktív szennyezése évről évre növekedett, s egyre nagyobb veszélyt jelentett az emberek egészségére. Az esővel vagy száraz ülepedéssel a talajba kerülő radioaktív anyagok mennyiségét hazánkban is rendszeresen mérték – bár a mérési eredményeket nem hozták nyilvánosságra.

A hidrogénbomba robbanásakor keletkező lökéshullámok több ezer kilométer távolságban is mérhetők a *légnyomás változását regisztráló mikrobarográf* segítségével.

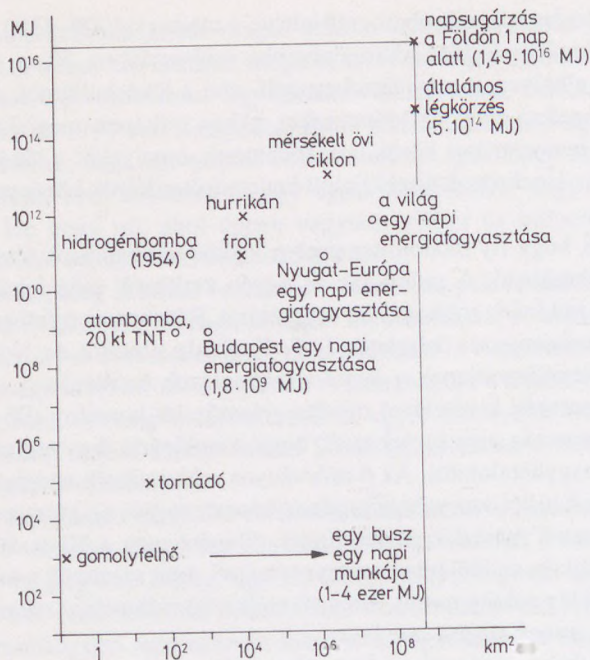
vel. Például a budapesti mikrobarográf jelezte a mintegy 4000–4500 km távolságban lévő Novaja Zemlján történt hidrogénbomba robbantást az 50-es évek végén. Ha nagy területen elhelyezett sok mikrobarográf jelzi a lökeshullámot, és óraműszerkezetük összehangoltan méri az időpontokat, akkor térképen megrajzolhatók azok a többé-kevésbé koncentrikus körök, az izochronok, amelyeket a lökeshullám azonos időben ért el. Az izochronok által kijelölt koncentrikus körök középpontja a robbanás földrajzi helye.

Nyilvánvaló, hogy ily módon nemcsak a légköri robbantások ténye, hanem azok helye is megállapítható. A műholdak és egyéb eszközök még inkább lehetetlenné tették a légköri nukleáris robbantások eltitkolását. Részben ez a felismerés, részben a növekvő légkörszennyezés készítette J. F. Kennedy elnököt és Nyikita Sz. Hruscsovot, hogy megállapodjanak a légköri robbantások betiltásában. Az egyezményt Kína és Franciaország kivételével minden jelentősebb kormány (96 ország) aláírta. Kína és Franciaország arra hivatkozott, hogy a nukleáris fegyverkezés terén elmaradtak a többi nagyhatalomtól. Az ő szórványos robbantásaik azonban gyakorlatilag elhanyagolhatóak a két szuperhataloméhoz képest, vagyis az atomcsend egyezmény óta valóban „csend” következett be. Ennek ellenére még a 70-es években is sokan hivatkoztak a légkör, az időjárás „megzavarására”, amit szerintük a nukleáris robbantások okoztak. Elég sokáig tartott, amíg sikerült a közvéleményt megnyugtatni azzal, hogy *ami nincs, annak hatása sem lehet.*

Kétségtelen, hogy gyakran nehéz belátni: milyen kicsi az ember a természettel összehasonlítva. Ezért hajlamosak vagyunk azt hinni, hogy az ember által befogott energiák jelentős beavatkozást jelentenek pl. a légkör, az időjárás viselkedésébe. Az összehasonlításra álljon itt néhány adat:

1. a Hirosimára ledobott atombomba (ami 20 kt TNT = trinitro-toluol, hagyományos robbanóanyaggal egyenértékű) energiája annyi, amennyit Budapest egy nap alatt felhasznál (1,8·10¹⁵ joule);
2. az 1954-ben felrobbantott H-bomba energiája nem több, mint amennyi a levegő mozgási energiája egy erőteljes hidegfrontban;
3. ugyanezen H-bomba energiája mintegy százszor kisebb egy mérsékelt övi ciklonban kialakuló mozgási energiánál;
4. a napsugárzásból egy nap alatt a Földre érkező energia (1,49·10²² J) pedig mintegy százezerszer nagyobb egy 20 Mt-s H-bomba energiájánál;
5. az általános légkörzés mozgási energiája kb. ötezerszer több az említett H-bombáénál (1. ábra).

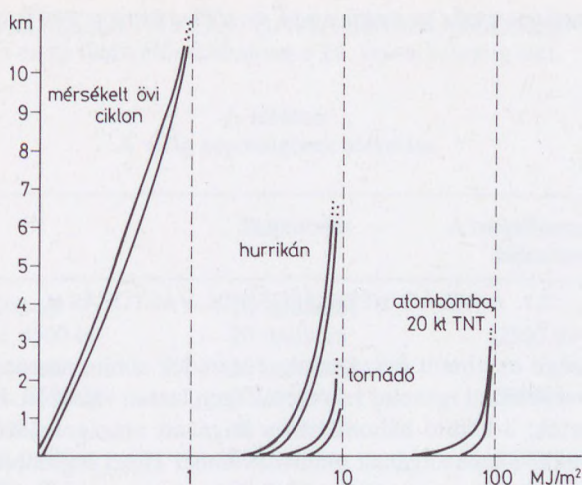
A pusztítás, amit egy bomba robbanása vagy valamely természeti erő (tornádó, hurrikán, szélvihar) okoz az energia koncentrációjával arányos. A mérsékelt övi ciklonban mozgó levegő energiája négyzetméterenként kerekén egy MJ, és ennek legnagyobb része nem a talajhoz legközelebb levő rétegekben van, hanem kb. 97%-a az 500 m fölötti légrétegekben. Egy jól fejlett ciklon ui. mintegy 1300–3500 km átmérőjű, kb. 1,5–10 millió km² kiterjedésű területen fejt ki hatását, függőleges kiterjedése eléri a 10–12 km-t.



1. ábra. A természeti erőforrások (x) és mesterséges erőforrások (o) energiája, valamint horizontális hatásterületüknek nagyságrendje (kivétel a busz egy napi munkája, amelyet nem lehet területre vonatkoztatni)

Ezzel szemben egy atombomba kb. 5–8 km átmérőjű, 20–50 km²-nyi térségben végez irtóztatos pusztítást, ahol a hirtelen felszabaduló energiasűrűség átlagosan 100 MJ/m², ennek jelentős része a talajközeli légrétegekben koncentrálódik. A H-bomba energiasűrűsége az atombombáét csaknem ezerszeresen meghaladja. (Meg kell azonban jegyeznünk, hogy a nukleáris robbantáskor nemcsak a hirtelen felszabaduló energia okoz pusztítást, hanem a keletkező radioaktív anyagok is, melyeknek hatása szinte kiszámíthatatlan.) Egy tornádó mintegy 50–100 m átmérőjű területen kialakuló heves forgószél, átmérőjének megfelelő szélességű sávban pusztít, néhány száz méter magasságig terjed felfelé. Energiasűrűsége mintegy 10 MJ/m² az alsó néhány száz méter vastag légrétegben. Hasonló energiasűrűség koncentrálódik a hurrikánokban, tájfunokban, trópusi ciklonokban (2. ábra). Ezekben az orkánerejű szél mellett rendkívül heves felhőszakadás okoz pusztítást.

Egy autóbusz egy napi üzemeltetésekor használ el annyi energiát, amennyi egy elszigetelt nyári gomolyfelhő kialakulásakor a légkörben felszabadul. És ha azt is figyelembe vesszük, hogy az említett gomolyfelhő kialakulása 5–10 perc alatt megy



2. ábra. Az egy m^2 talajfelszín fölötti légoszlopban felszabaduló energia összege és magasság szerinti integrál görbéje. A görbék azt mutatják meg, hogy egy adott szint alatti egy m^2 alapterületű légoszlopban kb. mennyi energia koncentrálódik

végbe, akkor a légkörben néhány száz méter átmérőjű területen felszabaduló energia teljesítményére kerekén 10 000 kW-t kapunk. Ez egy utasszállító repülőgép teljesítménye. Igaz, a gomolyfelhőt kialakító termik csupán néhány percig „üzemel”.

Az ember által előállított energiák tehát eltörpülnek a természet energiái mellett. A természet mégis sebezhető. Sebezhető a légkör is, de nem annyira az ember által előállított energiák révén, hanem a tágabb értelemben vett környezetszennyezés által.

A környezet szennyezésével kapcsolatban lehetőleg külön kell választani azokat a káros hatásokat, amelyekről biztos tudomásunk van, azoktól a hatásoktól, amelyeknek veszélyessége vitatott és nehezen kiszámítható. Hogy a napjaink emberének oly sok aggodalmat okozó és igen sok szakembert foglalkoztató problémát megismerhessük, először vizsgáljuk meg mi is történt a 20. században. Mik voltak azok az események, amelyek most fordultak elő először a történelemben, és így új, eddig nem ismert helyzet elé állították az emberiséget, merőben új kihívást jelentettek a tudósok számára?

2. A NÉPESSÉGROBBANÁS KÖVETKEZMÉNYEI

2.1. A VILÁG NÉPESSÉGÉNEK VÁLTOZÁSA

A Föld népessége az elmúlt évszázadok, évezredek során, amennyire ezt egyáltalán megbízható adatokkal igazolni lehet, csak igen lassan változott. Ennek történelmi okai jól ismertek: a hódító háborúkban a leigázott országok lakosságát szabad prédának tekintették, a rabszolgának elhurcolt ember életét legtöbbször semmilyen törvény nem védte. Ugyanakkor a járványok közül a fekete himlő és a malária szinte állandóan szedte áldozatait, a pestis, kolera időnként egy-egy területen néhány év leforgása alatt irtózatossá pusztítást okozott a lakosságban, de a tuberkulózis és a lepra is sok országban számított veszedelmes népbetegségnek.

Hála az orvostudománynak, a legtöbb járványos betegségnek megtalálták az ellenszerét. Védőoltásokkal, gyógyszerekkel, a fertőzések megelőzésével sikerült sok országban megfékezni a járványok terjedését, legalábbis ott, ahol van elegendő orvos és megfelelő egészségügyi ellátás. A halandóság ezen országokban jelentősen csökkent, az átlagos emberi életkor megnövekedett. S bár az ezer lakosra jutó születések száma a 19. századról a 20. századra a világ csaknem valamennyi országában jelentősen csökkent, a meghosszabbodott életkor miatt a népesség mégis erőteljesen növekedni kezdett. A népesség növekedése a fejlett országokban a 20. században észrevehetően lassult, az ún. fejlődő országokban azonban igen erőteljes. Álljon itt néhány szemléltető adat a világ népességének alakulásáról az „írott” történelem hajnalától a 21. század elejéig (ez utóbbi előrejelzés) (I. táblázat).

Bár ezen adatok közlése óta, az 1970-es és 1980-as években újabb és pontosabb fölmérések készültek, történeti szempontból fontos, hogy visszautaljak a kezdeti becslésekre. Ugyanis bármennyire távolinak tűnnek is az 1960-as évek elején végzett nemzetközi vizsgálatok, jelentőségük elvülhetetlen, hiszen az 1930-as évektől az 1960-as évekig tartó időszakban kezdett drasztikussá válni az egy főre jutó élelmi-szer-fejadag csökkenése világátlagban.

A teljes népességre vonatkozó adatok az ókorban, sőt a középkorban sem álltak rendelkezésre, ezért egyes kutatók becsléseire kell támaszkodnunk. A becslések hibái olykor elérik vagy kissé meghaladják az 50%-ot; a táblázatban szereplő adatok jó közelítésben a minimális és maximális becslésből számított középértékeket adják meg. A bizonytalanságok ellenére megegyezik a kutatók véleménye abban, hogy a világ népességének duplázódási ideje eleinte csak lassan, a 20. században hirtelen

rövidülni kezdett. 1930 után alig 45 évre volt szükség a világ népességének megkét-szereződésére, és ez az ütem előreláthatóan a 21. század elejéig tart.

I. táblázat
A világ népességének alakulása

Időköz	Szaporodás	A megkét-szereződés időtartama
Kr.e. 7000-től	10 millióról	2500 év
Kr.e. 4500-ig	20 millióra	
Kr.e. 4500-től	20 millióról	2000 év
Kr.e. 2500-ig	40 millióra	
Kr.e. 2500-től	40 millióról	1500 év
Kr.e. 1000-ig	80 millióra	
Kr.e. 1000-től	80 millióról	1000 év
Kr. születéséig	160 millióra	
Kr. születésétől	160 millióról	900 év
900-ig	320 millióra	
900-től	320 millióról	810 év
1710-ig	640 millióra	
1710-től	640 millióról	-
1820-ig	1000 millióra	
1820-től	1000 millióról	110 év
1930-ig	2000 millióra	
1930-től	2000 millióról	45 év
1975-ig	4076 millióra	
1975-től	4076 millióról	45 év
2020-ig	8200 millióra (becslés)	

Adatok: BAADE 1965 és BALÓ-LIPOVECZ 1989 forrásokból.

Megjegyzés: A legrövidebb kettőződési idő kb. 37–38 év volt a II. világ-háború utáni évtizedekben. A legújabb statisztikák szerint a népesség növekedésének üteme 1970 óta lassú csökkenést mutat.

Ezekre a tényekre a gazdasági szakemberek már régóta és többször fölfigyeltek. Különösen jelentős munkát végzett az ENSZ szakosított szervezete a FAO (Food and Agriculture Organization = Élelmezési és Mezőgazdasági Szervezet), továbbá a kiel-i Világgazdasági Intézet. Országokként fölmérték a mezőgazdasági termelés növekedésének lehetőségeit, a megművelhető területek nagyságát, az elérhető termés-hozamokat. Választ kerestek arra a kérdésre, hogy *hány embert tud eltartani a Föld*. A körültekintő fölmérés alapján megállapították, hogy az egész világon mintegy 4 milliárd hektárt lehet hasznosítani élelmiszer-termelésre. A jelenleginél jobb agro-

technikával ezen a területen 15–19 milliárd tonna gabonaérték termelhető, ami 30–38 milliárd ember ételmezésére elegendő (BAADE 1965). Erre a kérdésre a 2.4. részben még visszatérünk. Előbb azonban tekintsünk vissza a múltba, és vizsgáljuk meg legalább egy-egy kép felvillantásával az emberi civilizáció fejlődését.

2.2. A NOMÁD NÉPEKTŐL A CIVILIZÁLT TÁRSADALMAKIG

Az elmúlt évezredek, évszázadok során nemcsak a háborúk, betegségek, járványok ritkították a népességet, hanem egyebek között a természeti csapások is; ez utóbbiak között gyakran szerepelt a kedvezőtlen időjárás, szélsőségesen zord telek, aszályok és ezek nyomában az éhínség, alultápláltság. Az ókorban, de részben még a középkor elején is a nomád életmód, a mozgékonyság lehetővé tette, hogy az időjárás tartós megváltozására, az éghajlat kedvezőtlenre fordulására elvándorlással válaszoljon egy-egy terület népessége. Régészeti adatok bizonyítják pl., hogy Kr. e. 3000 körül a Szaharát pásztorkodó népek lakták, azaz a sivatag helyén legelők voltak, és a mainál nedvesebb éghajlat uralkodott. A Kr. e. 3. évezred végére azonban az elsvatagosodás következtében a pásztorkodó népek elvándoroltak.

A letelepedés majd elvándorlás a Földnek azokon a területein feltűnő, amelyek éghajlata a lakhatóság, megélhetés határzónáit képezték. Ilyenek a félszáraz, szemi-arid és a szubpoláris vagy tundra területek. Kr. e. 2000 körül India és Kelet-Afrika éghajlata szárazabbra fordult. A Nílus apadása miatt Egyiptom sötét korszakának is szökták ezt a kort nevezni. Hasonló okok miatt a Kr. e. 1300–700 közötti évszázadokat a *hellén világ sötét korszaka* néven emlegetik, a mediterrán térség szárazabbá válása, a téli esők elmaradása miatt.

Sajnos Ázsia félszáraz területeiről, sztyeppéiről kevés éghajlati adat áll rendelkezésünkre, így nem tudjuk a meg-megújuló népvándorlások indítékait éghajlati okokra visszavezetni. Annál több adatunk van az észak-atlanti térség poláris és szubpoláris területeinek éghajlat-ingadozásairól. Természetesen ezek úgynevezett „proxy” adatok, amelyek nem közvetlenül az időjárásra vagy éghajlatra, hanem annak következményeire utalnak. Esetünkben ilyen „proxy” adatok a régészeti leletek, a tengeri és szárazföldi jég kiterjedésére utaló jelek, a nagyon öreg fák évgyűrűi, a régi korokban lerakódott virápor, pollen elemzése stb.

Észak-Amerika legészakibb területein, a mai Kanada vidékén a Kr. e. 2000 előtti századokban rénszarvasvadászatból élő paleoindiónok és paleoeszkimók telepedtek meg, kialakítva az ún. „*első független kultúrát*”. Jól megfigyelték a karibúk vándorlási útvonalait tavasszal észak felé, ősszel dél felé keresve legelőket. E vadásznépek életüket teljesen a vadászatra rendezték be, a karibúknak, rénszarvasoknak szinte minden porcikáját hasznosítani tudták. Kr. e. 2000–1300 között ezen a területen zordabbra fordult az éghajlat, a hideg nyarak miatt megszűnt a rénszarvasok évszakos vándorlása, a vadászó népek eltűntek a vidékről. Kr. e. 1300–700 között ismét melegebb nyarak domináltak, Kanadában ekkor felvirágzott a paleoindiónok által

létrehozott „második független kultúra”, aminek a Kr. e. 700-tól beköszöntő hideg nyarak vetettek véget.

Az Atlanti-óceánnal határos vidékeken, a poláris és szubpoláris zónában jelentős melegedés kezdődött 600 körül. Ennek nyomán Grönland északnyugati tájain kialakult az ún. „Thule kultúra”*, amely 800 és 1100 között virágzott. Megalapítói az Amerika felől bevándorolt eszkimók voltak, majd a kalandozó normann hajósok a 10. században Vörös Erik vezetésével megkezdték a sziget gyarmatosítását. A körülbelül 1300-ig uralkodó enyhe éghajlat, a „középkori optimum klíma” elég biztonságos hajózást tett lehetővé a normannok számára Izland és Grönland felé. Ugyanakkor a pásztorkodó, legeltető életmód is lehetővé vált Grönland partvidékein. Az 1200-as évek második felében kezdődött s az 1600-as években egyre erősödő lehűlés miatt a jégtakaró Grönland és Izland partvidékén mind nagyobb területekre terjedt ki és hosszabb időszakokra tette hajózhatatlanná a tengert. A következő „kis jégkorszak”, amely csak a 19. század második felében ért véget, megváltoztatta Észak-Amerika, Grönland és Nyugat-Európa nagy részének éghajlatát, megnehezítette a hajózást az Atlanti-óceán szubpoláris területein. Végeredményben a XIV–XV. században a „kis jégkorszak” körülményei a grönlandi normann települések pusztulását okozták. A XIII–XVIII. század között Izland lakossága is kb. 40%-kal csökkent.

A városépítés, a földművelés és az ezzel gyakran együttjáró öntözéses gazdálkodás, a bányászat, az ipar azonban helyhez kötötte a lakosságot. Már az ókorban kialakultak fejlett kultúrák, városok, helyhez kötődő életformák. Asszíria legendás királynője, Szemirámisz a Kr. e. 9. század végén csatornákat építtetett, hogy a folyók vizével öntözze a száraz és terméketlen földeket. Mezopotámiában, Egyiptomban, de talán legkorábban Kis-Ázsiában jelentek meg azok a földművelő kultúrák, amelyek a vándorló életmóddal való szakítást jelentették. Az éghajlat kedvezőtlenre fordulásakor ezek a népek már nem kerekedhettek föl, és nem vándorolhattak mindenestől barátságosabb tájak felé. Természetesen, mint a legtöbb társadalmi átalakulás, a helyhez kötött életmód is hosszú történelmi folyamat során alakult ki.

A Bibliából jól ismert, történelemalakító vándorlások egyike volt Ábrahámé, aki Kr. e. 1850 körül vallási okok miatt kelt hosszú vándorútra családjával, házanépével és nyájaival együtt, hogy fölkeresse Kánaánt. Többé nem is tért vissza ősei földjére, Mezopotámiába. Unokája, Jákob (Izrael) az évekig tartó éhínség miatt küldte fiait Egyiptomba, hogy élelmet hozzanak onnan. A testvéreknek Józseffel való váratlan találkozása után Jákob hetvenötöd magával átköltözött Egyiptomba. Évszázadokkal később, a jelentős létszámú néppé szaporodott izraeliták, Mózes vezetésével, ismét vallási okok miatt kivándoroltak Egyiptomból, hogy hosszú és véres háborúk árán megszerezzék és birtokukba vegyék az Ígéret Földjét.

A hódítás, a gazdagabb területek birtokba vétele vagy egyszerű kifosztása hosszú időn át végigkíséri a történelmet. A középkorig tartó népvándorlások indítékai között

*Thule: eszkimó település, kereskedelmi állomás, jelenleg amerikai légitámaszpont, meteorológiai obszervatóriummal Grönland ÉNy-i részén. Koordináta: 76° ill. 77,5° é. sz., 70° ny. h.; az előbbi szélesség a légitámaszpont, az utóbbi az eszkimó település helyére vonatkozik.

bizonyára szerepet játszottak ezek, bár valószínű, hogy bizonyos esetekben az éghajlat ingadozásai is okai lehettek a terjeszkedésnek, új területek meghódításának. Ugyanígy az éghajlat kedvezőtlenre fordulása is hozzájárult egy-egy birodalom hanyatlásához. Egyes történészek valószínűnek tartják, hogy az 1600-as években az Anatóliát sorozatosan sújtó aszályok miatt egymást követték az Oszmán Birodalomban a lázadások, mivel az adók a rossz termések miatt elviselhetetlenekké váltak. Mindez hozzájárulhatott a Birodalom meggyengüléséhez a 17. század végére. Ettől fogva az Oszmán Birodalom fokozatosan zsugorodott egészen az I. Világháborút lezáró békekötésig, amikor Törökország nagyjából máig is érvényes határait kijelölték.

A tömeges népvándorlásnak az újkorban utat nyitott az új kontinensek felfedezése. A 16. századtól a 20. századig milliók költöztek át Európából, később Ázsiából is, továbbá az erőszakkal elhurcolt rabszolgák révén Afrikából, elsősorban Észak és Dél-Amerikába, valamint Ausztráliába. Így ez utóbbi kontinensek a legutolsó 2–4 évszázadban fokozatosan benépesültek. Az újkori tömeges vándorlás indítékai között kétségtelenül fontos szerepet játszottak a súlyos megélhetési gondok, az elszegényedés, a rossz termés. A tömeges és kényszerű kivándorlásnak egyik legmarkánsabb jelensége játszódott le a 19. században *Írországb*an. 1845-től kezdve az évekig tartó burgonyavész országos éhínséget okozott és tömeges éhhalált idézett elő. Az ezt követő évtizedekben olyan méretű kivándorlás kezdődött, hogy Írország lakossága 8 millióról 4 millió alá csökkent néhány évtized leforgása alatt.

A 20. század második felében teljesen új kép kezdett kibontakozni. Míg a század elején még nagy tömegek keltek útra Észak és Dél-Amerika, valamint Ausztrália felé, ahol a virágzó országokban nagy szükség volt a dolgozókra, addig a század második felében a befogadó államok egy része kezdett egyre szigorúbb bevándorlási korlátokat szabni. A nyomor elől való menekülés ugyan nem szűnt meg, az áttelepítés más országokba azonban egyre több korlátba ütközött, s gyakran csak illegálisan volt lehetséges, mint pl. az USA-ban engedély nélkül munkát vállaló mexikóiak esetében. A Föld lakható és gazdaságilag használható területei fokozatosan „megtelnek”.

Az időszakos természeti csapások azonban nem szűntek meg. A Szaharától délre húzódó, száraz szavanna éghajlattal jellemzett zóna, az ún. *Száhel-övezet* az 1960-as évek végén 1970-es évek elején sokat szenvedett a sorozatos aszályoktól. A bővizű Niger folyó mentén általában dús legelők vannak, az aszályok nyomán nemcsak a legelők száradtak ki, de a folyónak is csupán a medre maradt meg. Emberek száz-ezrei haltak éhen vagy szomjan, de még nagyobb számban pusztultak el tehenek és vadállatok. 1973-ban tömeges elvándorlás történt a nedvesebb éghajlatú tájak felé, s ennek az országhatárok sem szabhattak gátat.

Az ehhez hasonló emigrációs hullámok azonban napjainkban egyre kevésbé jelenthetnek gyökeres megoldást az élelmezési, megélhetési gondokra. A Föld lassan „összeszűkül” az ember számára, az egyes országok gondjai közvetve vagy közvetlenül az egész emberiség gondjaivá válnak. És ez nemcsak az élelmezési gondokra

igaz, hanem az egyéb természeti erőforrások, így elsősorban az energiahordozók utánpótlására is. Ezért a következő alfejezetben külön kell foglalkoznunk az emberi-
ség energiaproblémájával.

2.3. ENERGIAÉHSÉG A 20. SZÁZAD VÉGÉN

Az emberiség a történelem során soha nem használt annyi energiát, mint napjainkban. Az energiafelhasználás méreteit háromféle szempontból vizsgáljuk: a) az egy főre jutó energiafogyasztás jelenlegi és előrejelzett átlagaival; b) a világ összes energiafogyasztásának jelenlegi és előre jelzett értékével; c) a földfelszín felületegységére számított átlagos energiasűrűséggel.

Az egy főre jutó évi energiafogyasztás

világátlagban (1985-ben):	$65 \cdot 10^9$ J,
az USA-ban (1987-ben):	$366 \cdot 10^9$ J,
Magyarországon (1986-ban):	$131 \cdot 10^9$ J,
Afrikában (1975-ben):	$9,7 \cdot 10^9$ J.

Becslések szerint 2075-re a fejlődés jelenlegi tendenciái alapján a várható egy főre jutó évi energiafogyasztás:

az USA-ban	$782 \cdot 10^9$ J,
Kelet-Európában	$612 \cdot 10^9$ J,
Afrikában	$67 \cdot 10^9$ J.

Mit jelentenek ezek a számok? Egy jó erőben lévő ember napi erőltetett munkájával mintegy 2 MJ ($2 \cdot 10^6 \text{ J}$) munkát képes végezni, 365 nap, azaz egy év alatt kb. 730 MJ -nak megfelelő munkát. Ez egy agyonhajszolt rabszolga évi maximális energia-kifejtése. Ezt összevetve az egy főre jutó energiaigény fenti adataival: az energiaszükséglet megfelel 1985-ben világátlagban 89 rabszolgamunka/lakos, a fejlettebb ipari országokban 300–500 rabszolgamunka/lakos, 2075-ben az USA-ban 1070 rabszolgamunka/lakos igénynek. Nyilvánvaló, hogy egyetlen ókori rabszolgatartó hatalom sem dicsekedhetett ekkora rabszolgatömeggel.

Ha rabszolgák helyett „lóerőben” számolunk, akkor kb. 10-szer kevesebb igásállat erejét kellene igénybe venni, mint rabszolgáét, vagyis a fejlett ipari országokban 30–50 igásállat kellene lakosonként. Az is nyilvánvaló, hogy ilyen tömegű igásállattal nem rendelkezett sem az ókorban, sem a későbbi korokban egyetlen ország vagy társadalom sem.

A világ energiafogyasztása részben felmérések, részben előrejelzett adatok szerint:

	1980	1985	2000	2025	2075
MJ/év	$3 \cdot 10^{14}$	$3,3 \cdot 10^{14}$	$5,7 \cdot 10^{14}$	$12,4 \cdot 10^{14}$	$14,2 \cdot 10^{14}$

Összehasonlításként a napsugárzás energiája a földkorongon $5,47 \cdot 10^{18}$ MJ/év, vagyis kb. tízezerszer nagyobb, mint az emberiség összes energiafogyasztása a 20. század végén.

Az átlagos antropogén energiasűrűség a Föld különböző területein:

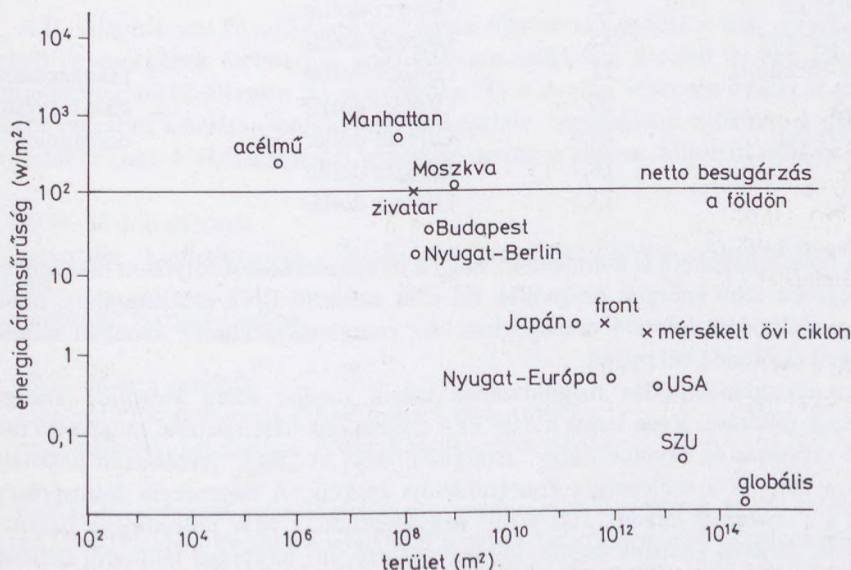
	W/m ²	MJ/év/m ²
világátlag (1985):	0,0205	0,646
Afrika (1985):	0,006	0,2
Kelet-Európa (1985):	0,333	10,5
Szovjetunió (1985):	0,085	2,68
Nyugat-Európa (1985):	0,603	19,0
USA (1985):	0,303	9,6
Japán (1985):	1,705	53,8
Budapest (1974):	36,24	1143

Ha a szoláris energiasűrűséget $1000\text{--}10\,000$ MJ/év/m²-nek vesszük, akkor a fenti adatokkal összehasonlítva megállapíthatjuk, hogy az antropogén energiasűrűség földrésznyi területek átlagában nem éri el az előbbi egy ezrelékét. Azokon a kisebb területeken azonban, ahol az ipar vagy a népsűrűség koncentrálódik, ott az energiasűrűség a szoláris energiasűrűség 1–10%-át is meghaladja (3. ábra). Így pl. Nagy-Budapest 525 km²-nyi területén az antropogén energiasűrűség évi átlagban (1974) megközelíti, a téli hónapokban meg is haladja a szoláris energia áramsűrűségét. New York belvárosa, Manhattan területén az antropogén energiasűrűség évi átlagban (1975) is nagyobb a szolárisnál.

Ezt a példátlan energiafogyasztást az energiaforrások gyökeres kicserélődése tette lehetővé. 1860-ban ugyanis az emberiség által felhasznált energia 15%-át még emberi, 73%-át állati erő szolgáltatta, 12%-át egyéb: szélmalom, gőzgép, vízimalom stb. 1988-ban a világ energiatermelésének 88%-a származott fosszilis energiaforrásokból (kőolaj, szén, földgáz), 7%-át vízierőművek, 5%-át nukleáris erőművek szolgáltatták. Az emberi és állati erő gyakorlatilag nem képvisel számottevő erőforrást.

Nyilvánvaló, hogy az energiaéhség a következő évtizedekben, főleg a fejlődő országokban, növekedni fog. A hagyományos energiahordozók készletei, az olaj-, a szén- és gáztartalékok végesek, új energiaforrások hasznosítására lesz szükség. A fejlett ipari országokban intenzív kutatás folyik annak felderítésére, hogy miként lehetne az emberiség energiaellátását a jövő évszázadban, illetve a további évszázadokra

biztosítani. Ennek egyik módja az energiatakarékos technológiák kifejlesztése. Érdekes ebből a szempontból összehasonlítani a volt szocialista és a régóta piacgazdálkodást folytató országok adatait. Az egy főre jutó bruttó nemzeti jövedelem és az egy főre eső évi energiafogyasztás aránya jól kifejezi az energiapiacarlás illetve takarékos-ság mértékét. Míg Portugáliában az egy főre jutó évi bruttó nemzeti termék (BNT) 2000 dollár körül mozog, az egy főre jutó évi energiafogyasztás 50 GJ, addig Magyarország, Lengyelország, Románia, Bulgária, Szovjetunió egy főre jutó BNT-je 1500–3000 dollár között alakult, az egy főre jutó évi energiafogyasztás Magyarországon 132 GJ, Lengyelországban 145 GJ, Romániában 150 GJ, Bulgáriában 180 GJ, a Szovjetunióban 200 GJ.



3. ábra. Energia áramsűrűség az energiaforrás kiterjedésének függvényében

Jelölések: x – természetes, o – antropogén erőforrás illetve fogyasztás

Görögországban az egy főre jutó BNT 3500 dollár, az egy főre jutó évi energiafelhasználás 80 GJ, ugyanakkor Csehszlovákiában az egy főre jutó BNT kb. 4000 dollár, az évi energiafogyasztás fejenként 200 GJ.

A volt NDK-ban az egy főre jutó BNT kb. 5600 dollár, az évi energiafogyasztás 240 GJ fejenként. Ez valamivel több, mint Finnorszáé, ahol az egy főre jutó BNT 11 200 dollár.

(Az itt szereplő adatok a Tudomány című folyóirat 1990 novemberi, tematikus számából erednek.)

Ha az egy főre jutó évi BNT-t arányba állítjuk az egy főre jutó energiafelhasználással, akkor a következő összehasonlításokat kapjuk:

Szovjetunió	100	GJ/ezer dollár	
Bulgária	90	GJ/ezer dollár	volt szo-
Lengyelország	96	GJ/ezer dollár	cialista
Románia	75	GJ/ezer dollár	(tervezdál-
Magyarország	57	GJ/ezer dollár	kodást folyta-
Csehszlovákia	50	GJ/ezer dollár	tó) országok
NDK	43	GJ/ezer dollár	
Portugália	25	GJ/ezer dollár	
Görögország	23	GJ/ezer dollár	
Nagy-Britannia	21	GJ/ezer dollár	piacgazdálko-
NSZK	20	GJ/ezer dollár	dást folytató
Finnország	19,6	GJ/ezer dollár	országok
USA	18,7	GJ/ezer dollár	
Svájc	13,5	GJ/ezer dollár	

A fenti arányokból is szembetűnő, hogy a tervezdálkodást folytatott országokban lényegesen több energiát használtak fel ezer dollár/fő BNT előállításához, mint a piacgazdálkodást folytató országokban. Az energiatakarékosság azonban mindkét típusnál elsőrendű cél marad.

Az energiautánpótlás megoldásának másik módja: főleg *megújuló energiaforrások* feltárása. Ilyen lenne a nap- és a szélenergia hasznosítása; mindkettő megújuló erőforrás és egyúttal „lágy” *energiahordozó*. A „lágy” jelzőt azért használják, mert a nap- és a szélenergia koncentrációja csekély. A napenergia áramsűrűsége, mint a 3. ábrán is látható, 100 W/m² nagyságrendű, 1 MW teljesítmény hasznosításához, 30%-os hatásfok esetén, mintegy 33 ezer m² nagyságú felületről kellene a napsugárzást összegyűjteni. Ez igen nagy beruházást igényel. A szélenergia hasznosításakor az 1 m² merőleges felületen átáramló levegő teljesítményét szokták alapul venni, ez a szélesség harmadik hatványával arányos. Ha pl. a szélesség 6 m/s, akkor a rá merőleges 1 m² felületen áthaladó légmozgás teljesítménye 130 W/m², 8 m/s szélesség esetén 307 W/m², 10 m/s esetén 600 W/m² és így tovább. Ezt a teljesítményt azonban 100% hatásfok esetén kaphatnánk, ami természetesen irreális. Mindenesetre a fenti nyers adatokból is érzékelhető, hogy jelentős, pl. 1 MW teljesítmény hasznosításához 10 000 m² nagyságrendű felület, vagyis sok és nagyméretű szélkerék szükséges.

A nap- és a szélenergia hasznosításával, minél nagyobb hatásfok elérésével számos országban kísérleteznek. Ezen kísérletek között kell megemlítenünk az úgynevezett szolárházak tervezését, amelyekkel elérhető, hogy a háztartási energiaszükséglet 40–50%-át a napenergia biztosítja.

Minthogy az egy főre jutó energiafogyasztás általában az életszínvonal egyik értékmérője, várható, hogy a jövőben sok országban növekedni fog az energiaéhség. A fejlett országokban, így Angliában, az USA-ban, Német- és Franciaországban az 1880-as, illetve az 1920-as évektől, Japánban az 1940-es évektől folyamatosan csökken az ezer dollár BNT előállításához felhasznált energia. A fejlődő országokban várhatóan csak az ezredforduló körül kezdődik a hasonló értelemben vett energiatakarékosság. Az életszínvonal fenntartása vagy növelése mindenesetre igen nagy kihívást jelent a tudósoknak éppúgy, mint a mérnököknek és gazdasági szakembereknek.

2.4. ÉLELMISZERGONDOK

A II. világháborút követő évtizedek egyre súlyosbodó gondja a világ gyorsan növekvő népességének élelmezése volt. Gyorsan csökkenni kezdett az egy főre jutó élelmiszertermékek átlaga a 30-as évektől a 60-as évekig vészesen csökkent az aratáskor meglévő kenyérgabona-tartalékok készlete. Ugyanekkor csökkent a gabonát exportáló és növekedett a gabonát importáló országok száma. Álljon itt néhány adat:

1934–38-ban gabonát

exportált: Latin-Amerika, Észak-Amerika, Kelet-Európa, Ausztrália, Ázsia, Afrika,

importált: Nyugat-Európa.

1962–64-ben gabonát

exportált: Észak-Amerika, Ausztrália, Latin-Amerika,

importált: Nyugat-Európa, Ázsia, Kelet-Európa, Afrika.

Ezeket a fenyegető előjeleket látva, a gazdasági szakemberek az 50-es évektől egyre intenzívebben kezdtek foglalkozni a nehéz helyzetben lévő országok élelmezési gondjainak megoldási lehetőségeivel. A felmérések szerint 1960 körül a világon kerekén 350 millió család élt a mezőgazdaságból, közülük 250 millió még mindig faekét, sőt, csupán kapát használt. 90 millió család dolgozott olyan faekével, amelyet tehenekkel, ökrökkel, lovakkal vagy öszvérekkel vontattak. A motoros ekék száma világviszonylatban kb. 6 millió volt. Ha nem a mezőgazdaságban élő családokat, hanem a művelés alatt álló földterületet vesszük figyelembe, akkor is azt a következtetést vonhatjuk le, hogy a Földön a szántóterületnek több, mint a felét faekével művelték.

Nem volt sokkal jobb a helyzet a száraz területek öntözésével sem. A Földön ekkor 160 millió hektárnyi területet öntöztek, amely terület négyszeresére lett volna növelhető további folyamszabályozás útján. A területnek legfeljebb 2%-át permetezéssel, 98%-át csatornákból vagy árasztással öntözték. A csatornázással történő öntözés azonban vízpazarló és szikesedést okoz, szemben az esőztető, csepegtető öntözés

előnyeivel. Nagy károkat okoz, ha a vizet betonozott csatornák helyett csupán árokban vezetik el. India és Pakisztán éhezõ országrészeiben egészen 1960-ig az öntözés ellenére is csak legfeljebb egy tonnás termésátlagokat értek el hektáronként.

A FAO, a Ford- és a Rockefeller-alapítvány által kijelölt bizottságok számos tanulmányt készítettek a nehéz helyzetben lévõ országok élelmezési gondjairól. Ezen országok közül kiemelkedett India, Pakisztán, Törökország, Görögország, Spanyolország, Mexikó. Elõször 1963-ban Washingtonban hívtak össze Élelmezési Világkonferenciát, amelyet maga J. F. Kennedy elnök nyitott meg. Ennél is jelentõsebb volt az 1974-ben Rómában rendezett Élelmezési Világkonferencia. Jelentõségét meteorológiai szempontból az adja, hogy a 60-as évek végén, 70-es évek elején Afrikának a Szaharától délre húzódó, száraz szavannás zónája, az ún. *Száhel-övezet* sokat szenvedett az egymást követõ aszályoktól. Ennek a néhány száz kilométer széles zónának az éghajlatára jellemzõ, hogy a mintegy két hónapig tartó nyári esõs évszakon kívül egész évben nem kap csapadékot. Ha ez a rövid nyári esõzés elmarad, akkor az egész év száraz. Az évekig tartó aszályok miatt emberek százezrei haltak éhen, még nagyobb volt az elpusztult állatok száma. A Szahara homokja fokozatosan terjeszkedni kezdett dél felé, mivel a gyér növényzet nem tudott ellenállni a kíméletlen homokviharoknak.

Az élelmiszeradagok csökkenése mellett így fölmerült egy másik veszély: az éghajlat kedvezõtlen változásának lehetõsége. A világméretû éhínség elkerülése érdekében össze kellett fogni az erõket. A római Élelmezési Világkonferencia felszólította az ENSZ két szakosított szervezetét, a FAO-t és a Meteorológiai Világszervezetet, a WMO-t (World Meteorological Organization), hogy sajátos kutatási és mûködési területeiken dolgozzanak ki megfelelõ stratégiát, amely elõsegítheti a katasztrofális éhínség elkerülését.

A FAO tevékenységérõl az eddigiekben már volt szó. Egy fontos eredményt azonban meg kell említenünk, amely a Rockefeller-alapítványhoz kapcsolódik. Az ötvenes években kikísérleteztek egy különlegesen rövid- és keményszalmájú búzafajtát, amely megfelelõ agrotechnika segítségével igen jelentõsen megnöveli a terméseredményeket. Elõször Mexikóban kezdték ezt a búzafajtát tömegesen vetõmagként használni; ennek köszönhetõen Mexikó alig több mint egy évtized alatt, 1966-ra búzaimportõrbõl búzaexportõr lett, a búzatermése ez idõ alatt megháromszorozódott. A Rockefeller-alapítvány által nemesített búzafajtát ezért „mexikói csodabúzának” nevezték el. Ezt a „csodabúzát” ezután még négy olyan országban kezdték vetõmagként alkalmazni, amelyek Mexikóhoz hasonlóan az éhínségtõl szenvedtek: Spanyol-, Görög-, Törökországban és Pakisztánban. Ezen öt országban, az 1960-as népességüket figyelembe véve, mintegy 180 millió embert mentett meg az éhezéstõl a „mexikói csodabúza”.

Az említett öt ország, különbözõ külföldi segítség révén, tehát sikerrel oldotta meg élelmezési gondjait. Számos országban, így Indiában, Bangladesben, Szomáliában, Etiópiában, a Száhel-övezet sok országában azonban továbbra is sok millió ember szenved alultápláltságtól, sõt, hal meg az éhezéstõl. De a fejlett mezõgazda-

sággal rendelkező országok élelmiszer-termelése is erősen függ az időjárástól. Az energiagazdálkodás mellett a mezőgazdasági termelés is a jelenlegi éghajlathoz alkalmazkodott. Az éghajlat tartósabb megváltozása mindkét gazdasági ágban jelentős változásokat eredményezhet. Ezért vált szükségessé, hogy az éghajlat változékonyságát, ennek fizikai okait átfogóan tanulmányozzák. Erre a feladatra a mintegy 160 tagországot számláló Meteorológiai Világszervezet, a WMO a legalkalmasabb.

Idézzük itt az Egyesült Nemzetek XVI. Közgyűlése által 1961. december 20-án elhangzott 1721. (XVI) számú határozatából a légköri tudományokra vonatkozó részt:

„A Közgyűlés, elégtétellel tudomásul véve azt a jelentős előrehaladást, amelyet a világűrben elért eredmények a meteorológia tudománya és technológiája előtt feltártak, meggyőződve az időjárás kutatásában és analízisében a nemzetközi együttműködésből származó világméretű előnyökről,

1. javasolja az összes tagállamoknak, valamint a WMO-nak és más specializált szervezeteknek, hogy mielőbb és alaposan tanulmányozzák az űrkutatás eredményeinek felhasználásával a szükséges lépéseket

a) a légkör tudományának és technológiájának fejlesztésére, az éghajlatot befolyásoló alapvető fizikai erőhatásoknak és a nagytérségű időjárás-módosítás lehetőségeinek jobb megismerése érdekében;

b) a meglévő időjárás-előrejelzési adottságok fejlesztésére és a tagállamok segítségére, hogy azok ezeket az adottságokat a regionális meteorológiai központokon keresztül hatékonyan felhasználhassák.”

A határozat szövege utal az űrkutatás hasznosítására. Ne feledjük, hogy az első szputnyik fellövésének dátuma 1957. október 4-e, így 1961-ben a sokoldalúan használható űrkutatás még csak a kezdet kezdeténél tartott. A WMO gyorsan reagált erre az ENSZ-határozatra, az űrkutatás két vezető hatalmának, a Szovjetuniónak és az Egyesült Államoknak hathatós közreműködésével már 1962 júliusában beterjesztett egy jelentést az ENSZ Gazdasági és Szociális Tanácsa elé. Ebbe a jelentésbe beépítették egy meteorológiai világszolgálat, valamint a meteorológiai világ- és regionális központok illetve telekommunikációs rendszerek hálózata létrehozásának tervét.

Ezek a lépések teremtették meg az alapjait annak a sokoldalú és szinte az egész világra kiterjedő tudományos munkának, amely az időjárás és éghajlat változékonyságának minél jobb megismerését tűzte ki célul a 60-as évektől a 80-as, sőt, 90-es évekig. Nyilvánvaló, hogy a légkör, az egész Földet körülvevő gázburok egységes fizikai rendszer. Megfigyelése és megismerése csak nemzetközi összefogással, világméretű együttműködéssel lehetséges. Ennek a példa nélkül álló, nagy nemzetközi erőfeszítésnek részleteivel ismerkedünk meg a következő fejezetekben.

3. VILÁGMÉRETŰ LÉGKÖRKUTATÁS

3.1. A KEZDET KEZDETE

A meteorológia, ellentétben sok más természettudománnyal, hosszú évszázado-kon, sőt, évezredekben át embrióéletet élt: más tudományokon belül kezdett kialakul-ni. Az ókori görög természetfilozófusok írásaiban kb. a Kr. e. 6. századtól találunk olyan fejtegetéseket, amelyek egyes légköri folyamatok, a szél, a felhőképződés, vil-lámlás jelenségeire kerestek magyarázatot. Az első meteorológiai szakkönyvet Arisztotelész írta Kr. e. 350 körül, s könyvében meteorológiának nevezte az ég és a föld között lejátszódó jelenségeket, beleértve a meteorhullást is.

Koreában és Palesztinában már kb. 2000 évvel ezelőtt használtak csapadékmérő edényeket. A természettudomány nélkülözhetetlen eszköze a mérőműszer, ezért meteorológiáról mint természettudománnyról csak akkor beszélhetünk, ha már kiala-kultak azok a hiteles műszerek, amelyekkel a legfontosabb légköri paramétereket: a légnyomást, a hőmérsékletet, a szelet, a légnedvességet, a napsütést, a csapadékot mérni lehet. A hitelesség itt azt jelenti, hogy a különböző helyeken fölállított műszerek azonos vagy egymásba átszámítható és következetes mértékegységeket használnak és a mérések egymással összehasonlíthatók, azaz nem függenek a műszer minőségétől.

Az alapvető meteorológiai műszerek fölfedezése és tökéletesítése a fizika fejlődé-sével áll szoros kapcsolatban. Tekintsük át ezért a meteorológia szempontjából is fontos fizikai és földrajzi fölfedezések erősen rövidített kronológiáját.

1492–1502	<i>Kolumbus</i> négyszer kel át az Atlanti-óceánon, és Ny felé mindig a passzátszelek zónájában, a 10–25° északi szélességek között vitorlázik, visszafelé előnyben részesíti a közepes szélessé-geket, ahol ellenkező szélirányok a gyakoribbak.
1597 körül	<i>Galilei</i> elkészíti termobaroszkópját, amely a levegőnek hő hatá-sára történő tágulását méri.
1604	<i>Kepler</i> megkezdi rendszeres zivatarfigyeléseit Prágában.
1611	<i>Galilei</i> : első folyadékhőmérő (festett víz).
1632	<i>Galilei</i> megkísérli azt, hogy a keleti passzátszeleket a földfor-gásra vezesse vissza.
1640 körül	<i>Toscanai Ferdinánd</i> : borszesszel működő hőmérőt szerkeszt.

- 1643 *Torricelli* rábeszéli *Vivianit* a higanyos légnyomásmérő elkészítésére.
- 1654 *Guericke* a „magdeburgi félgömbökkel” látványos kísérletben bizonyítja be a levegő nyomását.
- 1660 *Guericke* a barométerrel gyors nyomáscsökkenést észlel vihar előtt és először tesz kísérletet viharok előrejelzésére.
- 1665 *Huygens* a hőmérsékleti skála két alappontjának a víz fagyás, illetve forráspontját ajánlja.
- 1676 *Mariotte* először végez magasságmeghatározást barométerrel.
- 1686 *Halley* először készít térképet a szél globális eloszlásáról.
- 1724 *Fahrenheit* első fokbeosztásos higanyhőmérője.
- 1730 *Réaumur* új hőmérsékleti fokbeosztást készít.
- 1735 *Hadley* elkészíti az általános földi légkörzés sematikus leírását, ezen belül az azóta róla elnevezett Hadley- vagy passzát cirkuláció modelljét.
- 1736 *Celsius* új hőmérsékleti skálát vezet be (a víz forráspontja 0°, fagyáspontja 100°, 1745 óta fordítva).
- 1747 *Franklin Benjamin* papírsárkánnyal kísérletet végez annak bizonyítására, hogy a villámlás elektromos kisülés.
- 1753 *Winkler* fölfedezi a villámhárítót (*Franklintól* függetlenül).
- 1783 *Edgeworth* forgókanalas szélmérőt készít.
- 1783 *Saussure* hajszálas higrométert szerkeszt a légnedvesség mérésére.
- 1800 *Herschel* kimutatja a láthatatlan hőszugárzást.
- 1800 *Ritter* fölfedezi a Nap ultraibolya sugárzását.
- 1802 *Humboldt* (*Alexander*) fölfedezi a Perui- (*Humboldt*-) áramlást.
- 1805 *Beaufort* tapasztalati szélerősségskálát szerkeszt, amit előbb a tengereken, később a szárazföldeken is alkalmaznak.
- 1820 *Brandes* először publikál nagytérségű, szinoptikus időjárási térképet 1783-ból származó adatok felhasználásával.
- 1824 *August* a párolgás okozta lehűlést a levegő nedvességének mérésére használja fel (pszichrométer).
- 1835 *Coriolis* a földforgás eltérítő erejének hatását vizsgálja a mozgó földi tárgyakon.
- 1838 *Dove* tökéletesíti, illetve átdolgozza az általános légkörzés *Hadley*-féle sémáját (lásd 1735).
- 1843 *Morse* elkészíti az első használható távírót.
- 1846 *Maury* globális térképet készít a szél- és tengeráramlásokról.
- 1855 *Le Verrier* Párizsban megszervezi az első, nemzetközi megfigyelő hálózattal működő időjárásjelentő intézetet.
- 1857 *Buys-Ballot* megfogalmazza a bárikus széltörvényt.
- 1861 *Wild* lengőlapátos szélmérőt készít.

1871	<i>Wild</i> párolgásmérő mérleget szerkeszt.
1876	<i>Rédier</i> barográfot (légnomás regisztrálót) szerkeszt.
1879	<i>Stokes</i> a <i>Campbell</i> -féle üveggolyó felhasználásával napfénytartammérőt készít.
1880	<i>Aiken</i> aeroszol részecske számláló műszert szerkeszt.
1882/83	Első nemzetközi poláris év. Ennek keretében az Osztrák-Magyar Monarchia önálló megfigyelő állomást állított fel a Jan Mayen szigeten.
1887	<i>Abercomby</i> : körülutazza a Földet, hogy bebizonyítsa: a felhőfajták mindenütt azonosak a világon.

Ez a korántsem teljes felsorolás is bizonyítja, hogy a legfontosabb meteorológiai mérőműszerek kialakításában, az alapvető légkörtani ismeretek összegyűjtésében, a légköri jelenségek megfigyelésében és magyarázatuk keresésében milyen sokféle foglalkozású ember vett részt: tengerészek, csillagászok, fizikusok, mérnökök, vegyészek. Nem szerepel a felsorolásban a 18. században élt magyar botanikus, *Kitaibel Pál*, aki Magyarországon rendszeres időjárási megfigyeléseket is végzett.

Az alapvető meteorológiai mérőműszerek fölfedezése és bevezetése lényegében az 1600-as évektől az 1800-as évek végéig ment végbe. A rendszeres méréseket végző klímaállomások száma az 1700-as évek végéig mintegy 18-ra szaporodott, az 1800-as évek végén több százra tehető. Ezzel lehetőség nyílt a különböző földrajzi helyek éghajlatának összehasonlítására, és megindulhatott az eltérő éghajlati osztályok rendszerezése. Nagy szolgálatot tett a műszerek egységesítésében és a megfigyelések összehangolásában az 1780-ban Mannheimben megalakult *Societas Meteorologica Palatina*, amelynek alapítója és mecénása a pfalzi választófejedelem volt. Ennek a szervezetnek keretében kezdte meg működését (1780-ban) Budán az első magyar meteorológiai állomás. Összesen 36 európai, 1 grönlandi és 2 észak-amerikai obszervatóriumban folytak rendszeres mérések. A szervezet 1780-tól 1792-ig működött.

Ennek az összehangolt nemzetközi megfigyelőhálózatnak a létrehozásában jutott először kifejezésre az a fölismerés, hogy a légköri jelenségek észlelését, a fizikai állapotjelzők mérését *egységes elvek* alapján kell végezni. Így vált lehetővé, hogy *Brandes* 1820-ban időjárási térképet rajzoljon, amely a különböző helyeken mért időjárási adatok (1783-as évből) ábrázolásával áttekintést nyújtott az időjárás egyidejű, nagytérségű állapotáról. Innen kapta nevét a meteorológia egyik legfontosabb ága, a *szinoptika* (görögül: szünopszisz = együttlátás, áttekintés).

A szikratávíró felfedezése (*Morse*, 1843) lehetővé tette az időjárási megfigyelések gyors továbbítását, a tengeren járó hajók figyelmeztetését veszélyes időjárási jelenségekre. A krími háborúban részt vevő angol-francia flotta pusztulása 1854. november 14-én, amit egy tengeri vihar okozott, arra készítette III. Napóleont, hogy a francia akadémia támogatásával megbízza *Le Verriert* egy nemzetközi megfigyelő

és gyorsjelentő időjárási szolgálat megszervezésére. Ez meg is valósult párizsi központtal 1855-ben.

Az egységes megfigyelési elveken kívül tehát szükségessé vált a *minél nagyobb térségre kiterjedő megfigyelőhálózat* kiépítése, és az *adatok gyors továbbítása*. Mindezek előfeltétele a *nemzetközi együttműködés*.

Több évi előkészítő munka után 1873-ban Bécsben, 20 ország 32 képviselőjének részvételével megalakult a Nemzetközi Meteorológiai Szervezet (IMO – International Meteorological Organization). Az IMO működésének egyik eredménye volt az Első nemzetközi poláris év (1882–83), amely a jól szervezett nemzetközi tudományos megfigyelés főpróbája lett. Ezt követte 50 évvel később a Második nemzetközi poláris év 1932–33-ban, majd 1957–58-ban a Nemzetközi geofizikai év.

A nemzetközi együttműködés föllendülése igazán a II. világháború után kezdődött. 1947 szeptemberében Washingtonban ült össze az Igazgatók Konferenciája, amelyen hazánkat *Aujeszy László* képviselte. Ez a konferencia megalkotta a szervezet új alkotmányát, s az új alkotmány jegyében jött létre 1951-ben az IMO utódként a *Meteorológiai Világszervezet* (WMO), amely az ENSZ keretébe tartozik.

A WMO négy fő programba foglalta tevékenységét:

1. Időjárási Világszolgálat (WWW – World Weather Watch) megszervezése.
2. Kutatási, oktatási és továbbképzési program.
3. Az ember és a környezet kölcsönhatásának kutatása.
4. Technikai együttműködés programja.

E rövid történeti áttekintéssel talán sikerült érzékeltetni azt, hogy a meteorológia miként vált önálló tudománnyá, továbbá, hogy mint környezeti tudomány, miként lett nemzetközi együttműködést igénylő tudománnyá. A 20. század második felében fölmerülő társadalmi igények a különböző tudományágak minden eddiginél szorosabb együttműködését tették szükségessé. A több tudományág bevonását igénylő kutatások a napjainkban oly sokat emlegetett *interdiszciplináris* vizsgálatok.

3.2. IDŐJÁRÁSI VILÁGSZOLGÁLAT

Az előzőekben láttuk, hogy a világ élelmezési gondjainak megoldására a FAO és más intézmények már az 1950-es években tanulmányok egész sorát készítették el. Csak ezek után került sor a washingtoni (1963), illetve a római (1974) Élelmezési Világkonferenciák összehívására. A világ gazdasági nehézségeinek megoldásában való részvétel a WMO számára is körültekintő előkészületeket kívánt. Az 1950-es évek végén, az 1960-as évek elején megindult úrkutatás a meteorológia számára soha nem remélt lehetőségeket nyitott meg.

Az ENSZ XVII. Közgyűlésén a világűr békés hasznosításának kérdése ismét napirendre került. Az 1962. december 14-én elfogadott 1802. (XVII) számú határozat III. részének 3. pontja szerint:

„A Közgyűlés ... javasolja, hogy a Meteorológiai Világszervezet, más ENSZ-szervezetekkel, valamint kormány szintű és nem kormány szintű szervezetekkel konzultálva, dolgozzon ki részletesebb hosszú távú tervet a meteorológiai szolgálatok és a kutatás helyzetének megerősítésére, különös hangsúlyt fektetve a meteorológiai műholdak felhasználására és ezeken a területeken a képzési és oktatási lehetőségek kiterjesztésére.”

A Közgyűlés idézett határozatának végrehajtásában az első lépés az időjárási megfigyelőhálózat kiterjesztése és új, korszerű technikai eszközök alkalmazása. Hogy jobban megértsük a megfigyelőhálózat jelentőségét a meteorológiában, gondoljuk végig a következőket.

A Föld felszínének kiterjedése 510 millió km^2 , ugyanakkor ez a felszín nem homogén: tengerek és szárazföldek, különböző növénytakarók és csupasz talajok, hegységek és alföldek váltogatják egymást. A felszínnel érintkező légrétegek fizikai és kémiai tulajdonságai erősen függenek az alattuk fekvő talajtól. Ha tehát a légkör fizikai állapotáról és a légkörben lezajló eseményekről minél pontosabb képet szeretnénk alkotni, akkor igen sűrűn telepített megfigyelőállomás-hálózatot kell kiépíteni. Az életünkben oly fontos szerepet játszó időjárás kialakulásának színtere a légkör alsó 10–18 km-es rétege, amely általában megegyezik a *troposzférával*. Mivel a talajfelszín állapota, hőmérséklete, nedvességtartalma, hó- vagy jégtakaróval borítottsága, növényzete időről időre maga is változik, ezért ennek megfigyelése az egész Földön 510 millió km^2 felszínre kell, hogy kiterjedjen. Ha az időjárás szempontjából kiemelkedően fontos troposzféra vastagságát átlagosan 12 km-nek vesszük (a legalsó 12 km vastag légrétegben található a légkör tömegének kb. 80%-a), akkor összesen 6120 millió km^3 térfogatú levegőréteg állapotát kell folyamatosan figyelemmel kísérni.

A legváltozatosabb képet a talajközeli mintegy 1 km vastag légréteg mutatja. Ezért az ún. felszíni mérőállomások telepítésében törekszenek a legsűrűbb hálózat kiépítésére. A troposzféra magasabb rétegei felé haladva a felszíni hatások egyre kevésbé érvényesülnek, és előtérbe kerülnek a nagytérségű tényezők: összefüggő nagyobb hegységek, nagy kiterjedésű alföldek, tengerek, tengeráramlások, a különböző földrajzi szélességű zónák a rájuk jellemző sugárzási viszonyokkal. Ezért a troposzférán is túlemelkedő, a sztratoszféra alsó rétegeibe, 20–30 km magasságig hatoló *rádiószondák* mérésiadatai nagyobb térségre reprezentatívak. A rádiószondázó állomásoknak a WMO által megkívánt átlagos sűrűsége: 500 km-es körzetenként egy állomás. Ez az előírt sűrűség Európában és Észak-Amerika nagy részén megtalálható, a világ legnagyobb részén azonban hiányzik. Hasonlóképpen egyenlőtlen a felszíni mérőállomások sűrűsége.

Ebben rejlik a meteorológiai műholdak jelentősége. Az ún. *poláris pályán keringő műholdak* lakott és lakatlan területekről egyaránt adatokat szolgáltatnak. Az Egyenlítő egy fix pontja fölött pályára állított és a földfelszínnel együtt a földtengely körül keringő *geostacionárius műholdak* 36 000 km magasságból a Földnek mindig ugyan-

azt az oldalát „látják”. A műholdak érzékelőberendezéseinek felbontóképessége a „talppontban” 1–5 km, azaz 1–25 km²-es objektumokat képesek megkülönböztetni. Összehasonlításképpen: a felszíni állomások számát tekintve világátlagban 50 000 km²-nyi területre jut egy állomás. A meteorológiai műholdak közül a *geostacionárius műholdak félóránként* továbbítanak információt az általuk „látott” földterületekről. A felszíni állomások mérésadataikat a nemzetközi forgalomba *3–6 óránként*, a rádiószondázó állomások többsége *12 óránként* továbbítja.

Végezzünk ezek után egy rövid számítást, hogy közelítő becslést kapjunk a világ minden részén folyó meteorológiai mérések adatmennyiségére. A világon jelenleg kereken 10 000 felszíni megfigyelőállomás működik, ezek többsége naponta négyszer sugároz meteorológiai adatokat a nemzetközi információcsere számára. Ez összesen mintegy 600 000 adat naponta; adatonként 8 bit-tel számolva a *felszíni mérések napi információmennyisége* az egész világon kb. 4,8 millió bit.

A rádiószondázó állomások száma a világon mintegy 800. Ezek zöme naponta két mérést végez, a szondák folyamatosan regisztrálva a légköri adatokat 20–30 km magasságig emelkednek. Így egy-egy rádiószonda állomás naponta kb. 160 adatot, azaz 1280 bit információt szolgáltat. A világon működő összes *rádiószondázó állomás naponta* kereken *egymillió bit* információt továbbít a nemzetközi adatsere útján a többi országnak.

A geostacionárius pályán keringő műholdak, mint amilyen az Európai Űrkutatási Hivatal (ESA) által az egyenlítő és a 0. hosszúsági kör metszéspontja fölé „állított” METEOSAT, félóránkénti mérései még nagyobb adatbőséget jelentenek. Három különböző hullámtartományban: a látható fény, az infravörös és a vízgőz mérésére szolgáló hullámsávban végez folyamatos méréseket. Ez *naponta* megközelítően *50 milliárd bit információt* jelent.

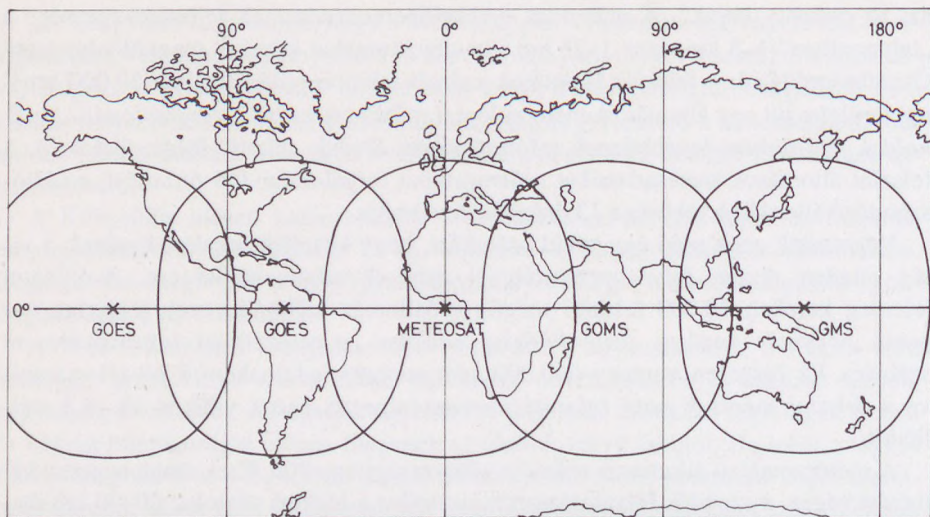
Mindezekhez járulnak még az egyes országok előrejelző központjai által naponta többször készített időjárási térképek, továbbá a meteorológiai mezők (légnyomás, hőmérséklet, felhőzet, csapadék) előrejelzései, amelyek regionális, hemiszférikus vagy globális térségeket foglalnak magukban.

A 150-nél több tagország minél eredményesebb együttműködése érdekében a WMO az 1963-ban tartott IV. Kongresszusán jóváhagyta az Időjárási Világszolgálat (WWW = World Weather Watch) koncepcióját. A WWW három alapvető összetevője:

- a *globális megfigyelőrendszer* (GOS = Global Observing System),
- a *globális távközlési rendszer* (GTS = Global Telecommunication System),
- a *globális adatfeldolgozó rendszer* (GDPS = Global Data Processing System).

E három rendszer koordinált együttese 1968. január 1-jén kezdett működni.

A *globális megfigyelő rendszer* két alrendszerből áll:



4. ábra. A GARP végrehajtása érdekében geostacionárius pályára állított műholdak talppontjai és látómezői. A GOES és a GOMS műholdakat az USA, a METEOSAT műholdat az Európai Űrkutatási Hivatal (ESA), a GMS-t Japán állította pályára

1. *felszíni alrendszer*, amely magában foglalja a szinoptikus alaphálózatot (kb. 10 000 állomás), az automatikus időjárási állomásokat, mozgó hajókat, automatikus tengeri állomásokat, repülőgépes megfigyeléseket, időjárási radarokat, háttérshy-nyeződést mérő állomásokat és sugárázsmérő állomásokat;

2. *űrbázisú alrendszer*, amelyet poláris pályán keringő és geostacionárius meteorológiai műholdak alkotnak (4. ábra).

A *globális távközlési rendszer* feladata, hogy az országos meteorológiai központok által rendszeresen összegyűjtött aktuális megfigyelési adatokat a kiépített távközlési csatornákon át eljuttassa a *regionális*- illetve *világközpontokba*. 1975-ben 23 regionális központ működött, az 1960-as évektől pedig rendre megalakultak a világközpontok: Moszkva, Washington és Melbourne. A déli félgömbön tervezett braziliai világközpont lett volna a negyedik, ez azonban nem valósult meg.

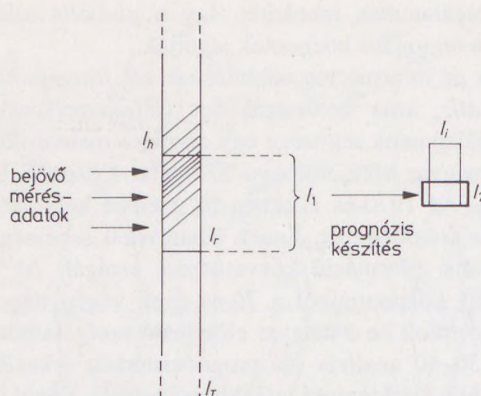
A regionális és világközpontok több feladatot is ellátnak. Egyrészt végzik a rendszeres adatgyűjtést és -elosztást az egyes országos központok között. Másrészt a naponta beáramló hatalmas adattömeget feldolgozzák, elkészítik a meteorológiai mezők úgynevezett analízistérképeit. Végül a meteorológiai világközpontok és a regionális központok nagyteljesítményű számítógépek segítségével előállítják a meteorológiai mezők előrejelzéseit, azaz a prognózistérképeket. A három világ- és 23 regionális központ tehát jórészt tehermentesíti az országos központokat azáltal, hogy naponta számos „készterméket” továbbít telex vagy fax útján, ezzel segítve

a tagországok szolgálatainak munkáját. Így a *globális adatfeldolgozó rendszert* (GDPS) a világ és a regionális központok alkotják.

Ismeretes, hogy az információtovábbításnak két formája van: 1. *analógiás*, azaz képszerű, 2. *digitális*, azaz betűszámkodós (alfanumerikus). Hogy mit jelent a regionális és világközpontok segítségével egy országos meteorológiai szolgálatnak, erre talán elegendő a magyar Meteorológiai Szolgálat Központi Előrejelző Intézetének példáját bemutatni. Az 1970-es években itt üzembe helyezték a „System 7” nevű telekommunikációs számítógépet. Ennek adatátviteli sebessége 1200 baud (bit/mp) és kizárólag digitális információ közvetítésére szolgál. Az Offenbach am Main, Bracknell regionális központjaiból a 70-es évek végén naponta másfél millió bit digitális információ futott be a magyar előrejelző szolgálathoz. Ezen túlmenően fax készülékek útján 30–40 analízis- és prognózistérkép érkezik naponta az említett regionális-, valamint a washingtoni világközpontokból. Végül külön berendezés szolgál a műholdfelvételek félóránkénti vételére.

Nem túlzás tehát, ha azt mondjuk, hogy az előrejelző intézetek „fulladoznak” a szüntelenül áramló információ özönében. Ennek ellenére bizonyossá vált, hogy az előrejelző szolgálatok nincsenek birtokában valamennyi, egy adott előrejelzés szempontjából fontos adatnak. A szerző véleménye, hogy paradox módon egyidejűleg túl sok, másrészt kevés a rendelkezésre álló információ egy adott előrejelzési feladat megoldásához. Ha pl. egy lokális időjárási jelenség: helyi zivatar, jégeső, szélvihar, köd, tornádó 2–3 órával korábbi előrejelzéséről van szó, akkor legfeljebb 200–300 km-es körzet légköri és talajállapotának igen finom tér- és időbeli felbontású analízisére van szükség. Ezt az igényt a jól összehangolt időjárási radarhálózat tudja többé-kevésbé kielégíteni. Egy balatoni vihar kitörése vagy elmaradása, a Ferihegyi repülőtérén keletkező vagy feloszló köd szempontjából a regionális központokból érkező információtömeg legnagyobb része *redundáns*, formálisan létezik, de az adott célra nem használható. Ha viszont az elkövetkező 5–10 nap időjárásának nagyvonalú jellemzése a feladat, akkor a légkör és a talaj, illetve tengerfelszín állapotának kontinentális méretű vagy hemiszferikus elemzésére van szükség, az előzőnél jóval nagyobb léptékű tér- és időfelbontással. Az is bebizonyosodott statisztikai vizsgálatok révén, hogy egy középtávú, 5–10 napos előrejelzés szempontjából a nagy térségről összegyűjtött mérésadatok nem egyenlő fontossággal bírnak. Az előidejű, aszinkron statisztikai kapcsolatok egy adott időjárási paraméter (hőmérséklet, csapadék) és az ezt megelőző és különböző helyeken mért adatok között igen eltérők. Az ilyen kapcsolatok elégtelensége vagy hiánya ismét a *redundancia* jele. A szoros kapcsolatok viszont az adatok hasznosságának jelei.

A földfelszín és a légkör állapotát pontosan leíró teljes adatmennyiség gyakorlatilag megszámlálhatatlan, az információ $I_T \rightarrow \infty$. Ebből egy adott feladat megoldásához, légköri jelenség fizikai értelmezéséhez vagy előrejelzéséhez szükséges hasznos információ, I_h , csak kisebb-nagyobb hibával határozható meg. A távközlési csatornákon beérkező és rendelkezésre álló információmennyiség mint *input*: I_1 , adott előrejelző központban elég pontosan megadható, pl. a budapesti előrejelző szolgálat



5. ábra. Az információ átalakulása egy meteorológiai előrejelzés során

Jelölések: I_T a légkör és a talajfelszín állapotát leíró adatok teljessége; I_h (vonalkázott rész) adott légköri folyamat fizikai megértése és előrejelzése szempontjából hasznos információ; I_1 a meteorológiai szolgálathoz beérkező, input információ; ennek egy része az adott feladat szempontjából redundáns: I_r ; I_i a „tökéletes” prognózisfeladat-megoldástól igényelt információ; I_2 a valójában nyert output információ. A nyilak munkavégzést jelölnek

esetében naponta 1,5 millió bit. Kissé bonyolult számítást igényel, de elvben kiszámítható a naponként kiadott prognózisok reális információtartalma, az *output*: I_2 (5. ábra). Nyilvánvaló, hogy a prognózisok bizonytalansága miatt a reális output információ kisebb, mint a mindig tökéletesen beváló prognózisoktól elvárható, igényelt I_i információmennyiség.

A reális I_2 output kétféle módon növelhető és közelítheti meg az igényelt I_i információt. Egyrészt az alkalmazott prognosztikai módszerek tökéletesítésével, másrészt azáltal, hogy a felhasznált I_1 input minél kevesebb redundanciát (I_r) és minél több hasznos információt tartalmaz. Ábránkon az I_1 -gyel le kellene fednünk az I_h -t.

Az előrejelző módszerek tökéletesítése, valamint az input információ kiválasztása a redundancia csökkentése érdekében, egyrészt megkívánja a légkörben és különböző tér- és időskálán lezajló jelenségek minél pontosabb ismeretét. Az is nyilvánvaló, hogy a légkör fizikai és kémiai állapota erősen függ a földfelszín állapotától, a felszín és a légkör kölcsönhatásaitól. Erről később, a 4. fejezetben lesz bővebben szó.

A légköri folyamatok globális megfigyelése, a WWW megszervezése a kiindulási alap. Ezen folyamatok fizikai megértéséhez egy következő nagy vállalkozásra volt szükség, amelynek megszervezését jórészt ugyancsak a WMO végezte el. A vállalkozás neve: Globális légkörkutatói program.

3.3. A GLOBÁLIS LÉGKÖRKUTATÁSI PROGRAM

Az Időjárási Világszolgálat (WWW) megvalósításával egyidejűleg kezdték meg a WMO és a Tudományos Egyesületek Nemzetközi Tanácsa (ICSU) közös vállalkozásaként a Globális légkörkutató program (GARP = Global Atmospheric Research Programme) kifejlesztését. Ennek célkitűzése:

„A GARP a troposzféra és a sztratoszféra azon fizikai folyamatainak tanulmányozásának a programja, amelyek lényegesek az alábbiak megértése szempontjából:

a) A légkör tranzienst viselkedése, ahogyan az időjárás változásait irányító nagytérségű fluktuációkban megnyilvánul; ez elvezet az egy naptól több hétig terjedő időszakokra szóló előrejelzések pontosságának növekedéséhez.

b) A légkör általános cirkulációjának statisztikai tulajdonságait meghatározó tényezők tanulmányozása, amely elvezet az éghajlat fizikai alapjainak jobb megértéséhez.”

Ez a program két különböző, de ugyanakkor egymással szoros kapcsolatban álló részből áll:

1. számítógépes módszerekkel egy sor elméleti modell szerkesztése és ellenőrzése, hogy lehetővé váljék a lényeges fizikai folyamatok és kölcsönhatásaik egyre pontosabb leírása;

2. a légkör megfigyelési és kísérleti tanulmányozása, hogy rendelkezésre álljon ezeknek az elméleti modelleknek a szerkesztéséhez.

A Globális légkörkutató program tulajdonképpen végső célja az Első globális GARP kísérlet, FGGE (First Global GARP Experiment) végrehajtása volt. Ezt azonban az 1970-es években egy sor alprogram előzte meg, illetve egészítette ki. A WMO 150–160 tagországát mozgósító példátlan méretű nemzetközi kísérletsorozat lebonyolítására külön Szervezőbizottságot jelöltek ki (JOC = Joint Organizing Committee).

Ezeknek az alprogramoknak megértéséhez, amelyek közül itt csupán néhányat emelünk ki, vissza kell térnünk az előzőekben bemutatott 5. ábránkhöz. Az időjárás hosszabb távú előrejelzésével foglalkozó meteorológusok már régóta sejtették, sőt, tapasztalatilag részben igazolták is, hogy az időjárás domináns eseményei: hetekig tartó aszályok vagy ismétlődő esőzések, tartósan megmaradó meleg vagy szélsőségesen hideg időszakok kapcsolatban állnak a légkör úgynevezett „boszorkánykonyháival”. Így pl. holland meteorológusok *Európa téli hőmérséklete és az ÉK-i paszáztszelek előző nyári erőssége* között találtak kapcsolatot az 1910-es években. Hasonlóan távkapcsolatokat talált T. G. Walker az 1920-as évek elején az indiai monszunesők és a Föld különböző pontjain előzőleg mért légköri paraméterek között. Ha tehát több hétre vagy hónapra előre akarjuk jelezni az *átlagos időjárást*: átlagos hőmérsékletet vagy csapadékoságot, akkor meg kell találnunk ezeket a „boszorkánykonyhákat”.

Fizikai megfontolásból arra gyanakszunk, hogy a trópusi tengerek fölötti meleg és nagy nedvességtartalmú légtömegek képezhetik az egyik „boszorkánykonyhát”.

Az északi és a déli 20° szélességek közötti trópusi zónában évente átlagosan $2,42 \cdot 10^{14}$ tonna eső esik, jórészt a kiadós záporokból, hatalmas zivatarfelhőkből. Az egész Földön évente lehulló csapadéknak ez csaknem a fele akkora területen, amely a fölfelszínnek egyharmadát teszi ki. Egy kilogramm vízgőz kicsapódásakor $2,5$ MJ kondenzációs hő szabadul fel. A trópusokon évente lehulló esőnek a vízgőzből való kicsapódásakor kerekén $6 \cdot 10^{17}$ MJ energia szabadul fel, ami a földfelszín egészére évente lejutó energia 16% -át teszi ki. Ez a hatalmas energia változatos formában, de mindenképpen jelentősen befolyásolja a légköri mozgásokat. A hosszabb távú előrejelzések szempontjából a nagy térségű és nagy tehetetlenségű mozgások lehetnek fontosak.

Ilyen nagy térségű jelenség a felsoroltakon kívül a chilei és perui partok közelében szabálytalan időközönként, de évtizedenként átlagosan megfigyelhető *El Nino*. Ennek lényege egy óceán-légkör kölcsönhatás, amelynek során a Dél-Csendes-óceán tengeráramlásában (Humboldt-áram, egyenlítői tengeráram) intenzitása átmenetileg megváltozik, s ez mélyreható változásokat okoz a régió légköri hőmérsékletében és a légkör nagyméretű cirkulációjában, egyik helyen felhőszakadásokat és áradásokat, más területeken aszályokat okozva. Az *El Nino* jelenséggel, főleg az 1970-es évek óta, egyre behatóbban foglalkoznak a kutatók, mivel a Humboldt-áramlás erősségének ingadozása hatással van távoli kontinensek időjárására, ugyanakkor nagy mértékben befolyásolja a perui halászatot (lásd 8. ábra). Erre a 4. fejezetben még visszatérünk.

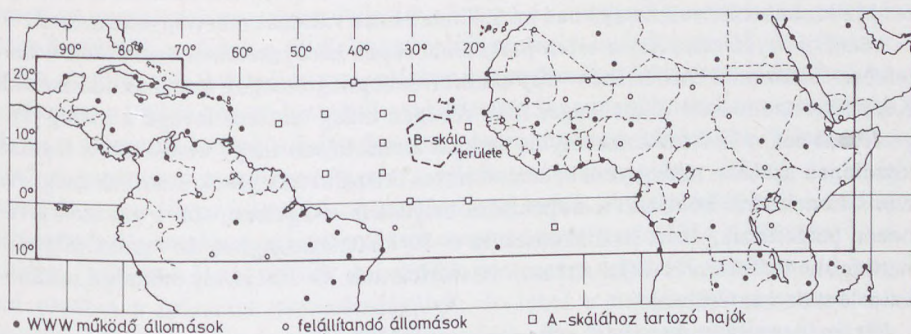
Az 5. ábránkon az adott előrejelzési feladat megoldásához szükséges „hasznos” mérésadatok terjedelme és tartalma (I_h) nehezen meghatározható, ezt fejezi ki a vonalkázás ritkulása a szélek felé. Meg kell tehát ismernünk azokat a fizikai folyamatokat, amelyek a trópusi „boszorkánykonyhában” lejátszódnak, és amelyek tartósan megváltoztatják a nagytérségű légmozgásokat, s ezáltal befolyásolják a Föld távoli területein hetekkel, hónapokkal később kialakuló időjárást.

Az itt erősen leegyszerűsített, de lényegében ezekhez hasonló megfontolások alapján dolgozták ki a GARP egyik alprogramjának, a GARP Atlanti trópusi kísérletnek a terveit. Ennek rövidítése GATE (GARP Atlantic Tropical Experiment). Hosszas fontolgatás után a kísérlet színhelyül az Afrikától Közép- és Dél-Amerikáig húzódó, valamint a 20° északi és 10° déli szélességekkel határolt zónát jelölték ki (6. ábra). Az Atlanti trópusi kísérlet végrehajtása három időszakban történt:

- I. fázis: 1974. június 26. – július 16.
- II. fázis: 1974. július 28. – augusztus 16.
- III. fázis: 1974. augusztus 30. – szeptember 19.

A kísérlet négy térskálát jelölt ki a különböző léptékű légköri folyamatok tanulmányozására:

- A – skála: a 2000–10 000 km kiterjedésű mozgásfolyamatok vizsgálatára,
 B – skála: 100–1000 km átmérőjű felhő-clusterek (csoportosulások) vizsgálatára,
 C – skála: 10–100 km átmérőjű felhőelemek vizsgálatára,
 D – skála: 1–10 km átmérőjű gomolyok, konvektív cellák vizsgálatára.



6. ábra. A GARP Atlanti trópusi kísérlet (GATE) végrehajtására kijelölt terület

A trópusi alprogram egyik fő célja volt a különböző skálák kölcsönhatásainak megismerése. A részletesebb munkafeladatok között szerepelt a troposzféra és alsó sztratoszféra makroléptékű háborgásainak leírása, a felhő-clusterek és a közepes méretű konvekció életciklusának leírása, a sugárzási folyamatok mérése, az óceán állapotának folyamatos megfigyelése, a tengeráramlások és passzátszelek változásainak együttes vizsgálata. A felszíni megfigyelőállomásokat poláris pályán keringő és geostacionárius műholdak mérései egészítették ki.

A kísérlet a kitűzött célok 80%-át teljesítette, és az összegyűjtött hatalmas adatmennyiség rendszerezése és feldolgozása sok időt vett igénybe. A szerzett tapasztalatok gazdagítják ismereteinket, látványos fölfedezések azonban egyre ritkábbak a meteorológiában.

*

A légkör egy másik „boszorkánykonyháját” az a zóna képezi, ahol a hideg sarki levegő meleg tengeráramlással találkozik. Az északi félgömbön két ilyen zóna található. Az egyik Grönlandtól délnyugatra, Új-Fundland, Új-Skócia, Labrador-félsziget közelében van. Itt a téli félévben a Kanada felől érkező arktikus légtömegek az Atlanti-óceán fölé érve a Golf-áramtól melegtített vízfelszínnel, illetve enyhe légtömegekkel találkozhatnak és ezáltal éles hőmérsékleti kontraszt alakul ki. Ezt erősíti a tengerfelszín hőmérsékleti kontrasztja is, hiszen egyrészt a Labrador-áram hideg,

másrészt a Golf-áram meleg vizet szállít ebbe a térségbe. A légkör a benne kialakuló éles hőmérsékleti kontraszt hatására dinamikailag igen heves mozgásokkal reagál. A különböző hőmérsékletű és sűrűségű légtömegek erőteljes föl- illetve leszálló-mozgást végeznek, miközben gyors és igen nagymértékű légnyomássüllyedés illetve -emelkedés váltja egymást. Előfordul, hogy egy nap alatt 25–30 mb-t süllyed, majd a következő napokon csaknem ugyanennyit emelkedik a légnyomás a talajközeli rétegben. Összehasonlításképpen: hazánkban az 5–8 mb/24 óra változás már nagyoknak számít.

A másik ilyen zóna *Ázsia keleti partjainál*, Japán környezetében van. A téli hónapokban Északkelet-Szibériából -30°C körüli hideg légtömegek hatolnak időnként a Kuro-Shio-áramlástól fűtött tenger fölé. Az igen hideg arktikus levegő a meleg tengerfelszínnel való érintkezés folytán drámai átalakuláson megy keresztül: a legalsó légrétegek gyorsan melegszenek, ezáltal heves felszálló mozgások indulnak meg. Az éles hőmérsékleti kontraszt a troposzféra magasabb rétegeiben, sőt, a sztratoszférában is jelentkezik, ezért itt alakulnak ki 6–30 km magasságban az északi félgömb legerősebb futóáramlásai (jet-stream). Itt mértek már 70–100 m/mp erősségű orkánokat is a sztratoszférában.

Ezt a „boszorkánykonyhát” célozta meg a GARP másik alprogramja, a Légtömeg-transzformációs kísérlet, AMTEX (Air Mass Transformation Experiment). Ennek szervezését és végrehajtását a Japán Meteorológiai Szolgálat vállalta magára, de részt vettek benne ausztráliai, kanadai és amerikai szakemberek is. Jellemző a japánok alaposására, hogy a szárazföldi és tengeri meteorológiai megfigyelésekhez a halászhajók is csatlakoztak az árbócaikra szerelt mérőműszerekkel. A végrehajtás két fázisban történt. Az első fázis 1974. február 14. és 28. között bonyolódott le a Ryukyu-szigetek térségében. A második fázisra 1975. február 14. és március 2. között került sor a Kelet-kínai-tenger fölött. A Ryukyu-szigetek a 30° szélességtől délre, kb. a 23° szélességig húzódnak, a Kelet-kínai-tenger pedig ezen szigetektől északnyugatra, a 30° szélesség környezetében van. Figyelemre méltó, hogy az arktikus légtömegek transzformálódása eredő helyüktől ennyire távol, a szubtrópusi övezetben a legmarkánsabb. Ismeretes, hogy a téli hónapokban Északkelet-Szibéria az északi félgömb leghidegebb területe, a 60 – 66° szélességek között fekvő Jakutszk és Ojmjakon állomásokon mérik a legalacsonyabb hőmérsékleteket, olykor -70°C -nál is nagyobb hideget. Ez a levegő azonban nemcsak hideg, hanem nagyon száraz is, hiszen minél hidegebb a levegő, annál kevesebb vízgőzt tud magában tartani. Az arktikus légtömegek transzformációja ezért nem csak hő-, hanem nedvességfelvételt is jelent a meleg tengerfelszín fölött.

*

A fentiekhez hasonló, regionális térségekre korlátozódó, de a légkör globális viselkedésének megértését célzó alprogramok voltak: a Poláris kísérlet (POLEX), a Monszun kísérlet (MONEX), a Hegyhatások megfigyelési kísérlete (MOUNTEX), közelebbről az Alpi kísérlet (ALPEX). Ezeknek a kísérleteknek célkitűzéseiben épp-

úgy, mint a GATE és AMTEX alprogramokéban, szerepet kaptak oceanográfiai, hidrológiai kérdések, a levegő, a jég és a tenger kölcsönhatásainak vizsgálata. Megemlítjük, hogy a GATE és MONEX végrehajtásában, az ALPEX tervezésében és végrehajtásában magyar szakemberek is közreműködtek.

Különleges figyelmet érdemel a sugárzási alprogram. A Napból a földi légkörbe érkező hatalmas sugárzási energia melegíti a tengereket, szárazföldeket és a légkört, ennek az energiának egy része átalakul a levegő és a tengerek mozgásává, jelentős része fordítódik a víznek a földfelszínről való elpárologtatására, az élővilág fenntartására. A több száz kilométer magasságban keringő műholdak sugárzásérzékelő be rendezései a légkör zavaró hatásától gyakorlatilag függetlenül mérik a napsugárzást. Mégis a műszerek különbözősége és nem egészen tökéletes kalibrálása (hitelesítése) miatt a *sugárzásra merőleges felszín 1 m^2 -ére másodpercenként érkező sugárzási energiát, a napállandót* korlátozott pontossággal mérik. A különböző műholdakkal, különböző időpontokban végzett mérések szerint a napállandó $1354\text{--}1380 \text{ W/m}^2$ -nek adódott (VON DER HAAR 1980). A mérések pontossága tehát 1% hibát enged meg, ami eredhet a műszerek pontatlanságából, de lehet a napállandó ingadozásának következménye is. Az azonos műszerrel hosszabb időn át végzett megfigyelések szerint a napállandó *átmeneti ingadozásokat* mutat, változása elérheti az 1%-ot.

A Föld átlaghőmérsékletének alakulása szempontjából alapvetően fontos, hogy a légkör külső határára érkező napsugárzásból mennyi érkezik a földfelszínre és mennyi a sugárzás vesztesége a légkörön való áthaladás során. Ezért két olyan alprogramot is kidolgoztak, amelyeknek célja a légköri energiáramlások összetett vizsgálata (CAENEX = Complete Atmospheric Energetic Experiment), illetve a teljes sugárzási kísérlet (COMRAEX = Complete Radiation Experiment).

Ezen kísérletek végrehajtását a Szovjetunió vállalta, amiben föltétlenül közrejátszott az a körülmény, hogy ebben az országban komoly hagyományai vannak a sugárzásméréseknek, s maga az ország is elég nagy kiterjedésű, a mérések végzésére kiválóan alkalmas sztyeppékkel és sivatagokkal.

Az Első globális GARP kísérlet, angol rövidítéssel FGGE előkészítésére és végrehajtására az 1970-es évek végén került sor a következő ütemezésben:

1. Az *előkészítő év* 1977. december 1-től 12 hónapon át tartott. Ekkor történt az új műholdak, a kommunikációs és adatfeldolgozó rendszerek munkába állítása, valamint a speciális megfigyelőrendszerek kipróbálása.

2. Az *adatgyűjtési periódus* 1978. január 1-jén kezdődött. Ennek során gyűjteni kezdték a WWW teljes megfigyelési anyagát.

3. Az *operatív év* kezdete 1978. december 1. Ekkor lépett munkába az FGGE teljes megfigyelő és adatfeldolgozó rendszere.

4. *Két speciális megfigyelési periódus (SOP)* az a két-két hónapos időszak, amikor a trópusok és a déli hemiszféra speciális megfigyelőrendszerei operatív munkába álltak;

SOP-I: 1979. január 5. – március 5. Ez az időszak az északi hemiszféra nyugati szélzónájának maximális intenzitásával esik egybe, és ilyenkor jól tanulmányozhatók a nyugati áramlást lezáró ún. blocking-helyzetek is, valamint a téli monszunok.

SOP-II: 1979. május 1. – június 30. Ez a periódus alkalmas az északi hemiszféra nyarán kialakuló, nagy térségű monszunfolyamatok elemzésére.

5. A két intenzív megfigyelési periódus a SOP-I és a SOP-II középső 30 napja. Kijelölésükre azért volt szükség, mert lehetetlen az összes speciális megfigyelőrendszert (hajókat, repülőgépeket) a SOP-ok teljes időszaka alatt folyamatosan üzemeltetni.

A globális kísérlet megfigyelési fázisát egy adatfeldolgozó és egy kiterjedt kutatási fázis követte. A GARP alprogramjai és az FGGE technikai lebonyolításáról szóló jelentéseket a WMO a GARP Special Reportok és más kiadványok sorozatában tette közzé. A kísérletek tudományos eredményei pedig beépültek és folyamatosan beépülnek a világ különböző országaiban folyó kutatásokba. Madártávlatból nézve a Globális légkörkutató program jól illusztrálja azt a grandiózus erőfeszítést, amit az óceán–szárazföld–légkör rendszerben lejátszódó összetett folyamatok megismerése és megértése kíván. Az egész világra kiterjedő kísérletek végrehajtásához felhasználták a korszerű technika szinte valamennyi vívmányát: automatikus mérőberendezéseket, hajókat, speciális repülőgépeket, poláris és geostacionárius műholdakat, rakétákat, nagy teljesítményű távközlési berendezéseket, számítógépeket.

Mégis, ha valaki azt várná ezek után, hogy tetszés szerinti időpontra, tetszőlegesen kiválasztott helyre, tetszés szerinti pontossággal jelezzük előre a várható időjárást, akkor erre két válasz közül az egyiket kellene mondani. Ez vagy olyan óhaj, mint a perpetuum mobile, amely ellenkezik a természet alaptörvényével. Az időjárást ugyanis számos előre nem kalkulálható jelenség, erdőtüzek, vulkánkitörések, emberi tevékenység befolyásolják, ezért lehetetlen minden tényezőt figyelembe venni. Vagy olyan óhaj, mint az alkimisták arany- vagy gyémánt csinálási törekvése. Különleges eljárással lehet gyémántot csinálni, de ez többbe kerül, mint az azonos nagyságú természetes gyémánt. A mi esetünkben a légkör globális és abszolút pontos megfigyelése, folyamatainak nyomon követése és előrejelzése többbe kerül, mint az előrejelzéstől várható haszon. Ezért meg kell elégednünk azokkal a korlátozott ismeretekkel, amit az emberi tudás elérni képes.

3.4. ÉGHAJLATI VILÁGPROGRAM

A Meteorológiai Világszervezet a WWW és a GARP kísérletek megszervezésével és megvalósításával nem fejezte be nagyjelentőségű vállalkozásainak sorát. Gazdasági és környezetvédelmi szakemberek az 1970-es évektől kezdve egyre több olyan problémát vetettek fel nemzetközi fórumokon (pl. *Környezetvédelmi Konferencia*, Stockholm, 1972; *Élelmezési Világkonferencia*, Róma, 1974), amelyek a természetes vagy antropogén okokra visszavezethető éghajlat-ingadozásokkal hozhatók kapcsó-

latba. A Meteorológiai Világszervezet VII. Kongresszusa (1975) egyik határozatában azt a feladatot jelölte meg, hogy az érdekelt nemzetközi szervezetekkel együttműködve részletes tervet kell kidolgozni az éghajlat fokozottabb tanulmányozására.

Az intenzív tervezőmunka fontos állomása volt az 1979 februárjában Genfben megtartott *Éghajlati Világkonferencia*, amelyen számos nemzet és nemzetközi szervezet több mint 350 szakértője vett részt. Mielőtt azonban ennek a konferenciának tevékenységét és határozatait ismertetnénk, meg kell említenünk, hogy ugyanezen év júliusában az angliai Norwich-ban is hasonló nemzetközi eseményre került sor. A világszerte ismert éghajlatkutató, *H.H. Lamb* irányításával „*Éghajlat és történelem*” címmel nemzetközi konferenciát rendeztek, amelyen csaknem száz előadás hangzott el. Az öt kontinensről összegyűlt résztvevők között jelent volt e sorok írója is. Maga az a tény, hogy egyetlen évben két nagy nemzetközi konferenciát is összehívtak e téma kapcsán, az éghajlat-ingadozások iránti nagy érdeklődést bizonyítja.

Az Éghajlati Világkonferencián, az előadásokat és vitákat követően a szakértők szűkebb köre operatív tervet dolgozott ki a 80-as évekre. Ezt a tervet, az *Éghajlati világhatározatot* a WMO 1979 májusában összeült kongresszusa fogadta el. E programot a következő részprogramok alkotják:

- a) éghajlati adatprogram,
- b) éghajlati alkalmazások programja,
- c) éghajlati hatások tanulmányozásának programja,
- d) éghajlatváltozás és -ingadozások kutatásának programja.

A végrehajtást a WMO feladatául tűzték ki, de más érdekelt szervezetek is részt vesznek benne, mint pl. a FAO, a Tudományos Egyesületek Nemzetközi Tanácsa (ICSU), az ENSZ környezetvédelmi programja (UNEP), az ENSZ Nevelési, Tudományos és Kulturális Szervezete (UNESCO), Egészségügyi Világszervezete (WHO).

Az 1980-as évtizedre meghirdetett Világprogram első célja az volt, hogy továbbfejlessze és tökéletesítse az éghajlati *adatok* megszerzését és hozzáférhetőségét. A Világprogram sikere nagymértékben függ egy olyan hatalmas adatbázis fejlettségétől, amely tartalmazza a meteorológiai, oceanográfiai, hidrológiai és geofizikai adatokat is. Ezenkívül hozzáférhetővé kell tenni biológiai, ökológiai, szociológiai és gazdasági adatokat, amelyeknek megszervezése túlnyúlik a WMO hatáskörén.

Az *éghajlati alkalmazások* programjának célja, hogy felvilágosítsa a felelős vezetőket az éghajlati adatok felbecsülhetetlen értékéről a gazdasági döntésekben és hosszú távú tervezésekben. Egy adott hely éghajlati adottságainak figyelmen kívül hagyása vagy félreismerése már számos nagyszabású gazdasági terv bukásához vezetett (magyar gyapot, gumipityang, szovjet szőzöld program stb.).

Az *éghajlati hatások tanulmányozásának* célja, hogy országonként, földrajzi körzetenként fölmérje az éghajlat-ingadozások hatását a mezőgazdaságra, vízháztartásra, energiagazdálkodásra, ökológiai rendszerekre stb. A világ különböző területein, ahol a természetes környezet, a társadalmi szerkezet vagy a gazdasági rendszerek és

a fejlettség foka nem azonos, az éghajlat ingadozásainak más és más hatása és visszahatása lehetséges. Fejleszteni kell tehát ismereteinket a gazdasági élet és az éghajlat kölcsönhatásairól.

A negyedik részprogram a tulajdonképpeni *Éghajlatkutató világháló*. Szociális és gazdasági életünk érzékenyen reagál az éghajlat minden változására, ugyanakkor az emberi tevékenység is befolyásolja, sőt, módosíthatja a helyi, a regionális és a globális éghajlatot. Ahhoz, hogy ezeket a hatásokat és kölcsönhatásokat felmérhessük, meg kell ismernünk az éghajlat mechanizmusát. Ennek alapján meg kell kísérelni az éghajlat előrejelzését, valamint annak a felismerését, hogy az esetleges változások milyen következményekkel járhatnak. Választ kell keresni a kérdésekre:

1. Milyen mértékben jelezhető előre az éghajlat?

2. Az emberi tevékenység milyen mértékű hatást gyakorol az éghajlatra?

Végül idézzük az Éghajlati Világkonferencia deklarációjának zárószavait, amelyek híven tükrözik a Világháló tartalmát:

„Az emberiség hosszú időre szóló életben maradása a társadalom és a természet közötti harmónia megvalósításától függ. Az éghajlat környezetünknek csak egyik alkotórésze, amelyet bölcsen kell hasznosítanunk. A környezet minden eleme mind közvetlenül, mind közvetve hat egymásra. Bármely nemzeti vagy földrajzi terület természeti környezetének pusztulásában az adott társadalom, sőt az egész emberiség nagymértékben érintve van, mert az éghajlatot máshol is befolyásolja. A világ minden nemzetének együtt kell dolgoznia annak érdekében, hogy megőrizze a talajok termékenységét, hogy elkerülje a világ erdőségeinek, termőterületeinek és vízkészletének ésszerűtlen kihasználását, hogy megállítsa a sivatagosodást, és csökkentse a légkör és az óceánok szennyeződését. Ez a tevékenység a nemzetek részéről nagy elhatározást és megfelelő erőforrásokat igényel, és mindennek csak akkor lesz értelme, ha a világon béke van.”

4. GLOBÁLIS ÉGHAJLATI RENDSZER

Az előző fejezetben, a világméretű légkörkutatás tárgyalása során, többször találkoztunk az időjárás és az éghajlat fogalmával. Ezek a mindennapi életünkben is gyakran emlegetett szavak. Szétválasztásuk, értelmezésük sokszor zavart okoz. Ha egy játékfilmet nézünk, emlékezetünkben vagy egy különösen érdekes jelenet, epizód, vagy maga a történet vezérfonala, egésze marad meg erősebben. Ugyanígy vagyunk a légköri eseményekkel is. Egy rövid távú program lebonyolítása, amely egy-két napot vagy néhány hetet vesz igénybe, és sikere az aktuális időjárástól függ, érdeklődésünket az adott időszak tranziens, átmeneti légköri eseményeire irányítja. Ekkor *időjárásról* beszélhetünk.

Amennyiben *hosszabb távú*, évekre, évtizedekre kiterjedő döntést kell hoznunk, és ez a döntés időjárásfüggő, akkor a tranziens légköri események gyakoriságai, évszakai menete, a légköri paraméterek (hőmérséklet, szél, felhőzet, napsütés, csapadék stb.) sokéves átlagértékei, és szélsőséges értékei érdekelnek. Gyakorlati szempontból tehát az *éghajlat egy adott földrajzi környezetben egymást követő időjárási események rendszere több év vagy évtized leforgása során*.

Az *időjárás és az éghajlat hasonlítanak* abban, hogy

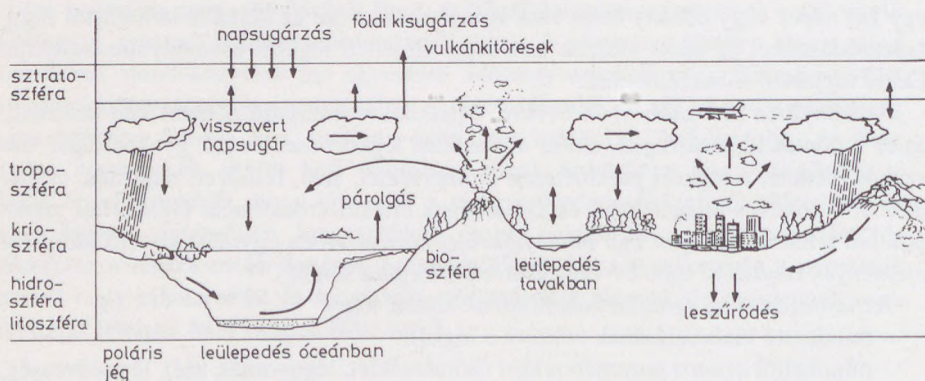
- mindkettő kialakulásának *színtere a légkör*,
- mindkettőt *azonos paraméterekkel* (hőmérséklet, légnyomás, szél, légnedvesség, felhőzet, csapadék, napsütés stb.) jellemezzük,
- megfigyelésükre *legtöbbször azonos műszereket* használnak.

Egy régi hasonlattal: az éghajlat a „kuglipálya”, az időjárás a guruló kugligolyók változó pályái az egyes dobások nyomán. A kuglipálya „állandó”, a golyópályák változnak.

Az éghajlat „állandóságáról” idővel kiderült, hogy csak viszonylagos. Évtizedes, évszázados, évezredes léptékben, sőt geológiai korszakokban mérve az időt, az éghajlat is ingadozik kisebb-nagyobb földrajzi környezetben, sőt az egész Földön. Ma már az is világossá vált, hogy a nagy tehetetlenségű éghajlat-ingadozások megmagyarázásához nem elegendő csupán a légkört tanulmányozni. A légkörben lezajló folyamatok kölcsönhatásban vannak a szilárd földkéreggel, a litoszférával, a felszíni és felszín fölötti vizekkel, a hidroszférával, a felszínt borító hó- és jégtakaróval, (a krioszférával) az élővilággal (a bioszférával). Ezért ezek együttesét *éghajlati rendszernek*, vagy *Föld-légkör rendszernek* szokták nevezni. Ennek öt komponense van:

1. atmoszféra,
2. litoszféra,
3. hidroszféra,
4. krioszféra,
5. bioszféra.

Az ezekhez kapcsolódó tudományok: a légkörtan (meteorológia), földtan, talajtan, hidrológia, oceanográfia, glaciológia, biológia, sőt, gazdaságtan és szociológia stb. Az egyes *szférák* bonyolult kölcsönhatásait egy vázlatos rajzzal szemléltethetjük (7. ábra). Az öt komponensből álló, összetett éghajlati rendszer a világűrből kapja a napsugárzás energiáját, és ugyanoda távozik a földi kisugárzás. A beérkező és eltávozó energiának egyensúlyt kell tartania, mert ellenkező esetben a Föld átlaghőmérséklete évről évre folyamatosan növekedne vagy csökkenne. Azt az átlaghőmérsékletet, amelyen a földi kisugárzás éppen egyensúlyt tart a beérkező napsugárzással, a *Föld egyensúlyi hőmérsékletének* nevezzük.



7. ábra. A Föld-légkör rendszer összetevői és ezek kölcsönhatásai

A napsugárzás egy része azonban visszaverődik a felhőkről és a földfelszínről. A műholdas mérések szerint a Föld jelenlegi visszaverő képessége, *albedója* 0,3, vagyis a napsugárzás 0,7-ed része a talajon és a légkörben elnyelődik. A jelenlegi albedót figyelembe véve kiszámítható a Föld egyensúlyi hőmérséklete. Az egyszerű számítás eredményeként 255 K-t azaz $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot kapunk. A *Föld tényleges átlaghőmérséklete* 287 K, vagyis $+14\text{ }^{\circ}\text{C}$, a valóságban mért földi átlaghőmérséklet tehát 32 fokkal magasabb az egyensúlyi hőmérsékletnél. Ez annak köszönhető, hogy a légköri gázok egy része a hosszúhullámú földi kisugárzást részben elnyeli. A légkör nélküli Föld, változatlan napállandót és földi albedót feltételezve, kb. 32 fokkal hidegebb, s így az

élet számára jórészt „lakhatatlan” lenne. Az is kiszámítható, hasonló föltételezésekkel, hogy a napállandó 1%-os változása 0,7 °C-os, az albedó 1%-os változása kb. 1 °C-os hőmérséklet-változást eredményezne a Föld egyensúlyi hőmérsékletében. A Föld átlaghőmérsékletét tehát a napállandó, az albedó és a légköri gázok „üvegház-hatása” együttesen alakítják ki.

A *litoszféra*, vagyis a Föld szilárd kérge több módon is hat a légkör állapotára. Egyrészt az erős szélviharok által fölkavart *por* és *homok* a napsugárzás egy részét visszaveri, csökkenti a felszínre jutó sugárzást. Műholdas felvételeken megfigyelték például, hogy a Szaharában dúló homokvihar mint valami óriási fátyol napokon át követhetővé vált. A keleti passzátszelek néhány nap alatt a Szahara homokfelhőjét átsodorták az Atlanti-óceánon egészen Közép-Amerikáig. Nálunk Európában is előfordul, hogy vöröses színű hó esik. Ezt is többnyire a Szahara homokja festi meg.

A különlegesen erős *vulkánkitörések* alkalmával nagy mennyiségű hamu kerül a sztratoszférába, amit a légáramlások szétterítenek a Föld nagy részén. A vulkáni hamu lassú leülepedése több évig is eltarthat, csökkentve a légkör átteresztőképességét és ezáltal csökkentve a felszínre jutó napsugárzást. Több neves kutató úgy vélekedik, hogy a vulkáni tevékenység aktív időszakai a globális hőmérsékletben akár néhány fokal lehűlést is okozhatnak, sőt, jégkorszakok kialakulásához is vezethetnek. Itt jegyezzük meg, hogy az alaskai Katmai vulkán 1912-es kitörésétől 1963-ig, az indonéziai Bali-szigeten lévő Agung vulkán kitöréséig, tehát 51 éven keresztül *nem volt nagyobb vulkánkitörés* a Földön. Ez is hozzájárulhatott ahhoz a globális melegedéshez, amely 1940-ben érte el tetőpontját a Föld átlaghőmérsékletében.

A legújabb kutatások arra hívják fel a figyelmet, hogy 30–40 millió évvel ezelőtt jelentős *geológiai erők* léptek működésbe. Ennek eredményeként emelkedett ki a Himalája és a vele összefüggő hegységrendszer, továbbá Észak-Amerikában a Sziklás-hegység. Számítógépes modellkísérletek szerint ez a két hegységképződés néhány fokal lehűlést okozott a Föld átlaghőmérsékletében, s talán ez lehetett az oka a 10–30 millió évvel ezelőtt megindult eljegesedésnek.

Az állandó hó- és jégsapka ugyanis nem volt jellemző a sarkvidékeken az elmúlt földtörténeti korokban. Az utolsó 600 millió éves időszak 90%-ában nem borította állandó jégtakaró a pólusokat. Ha viszont a *krioszféra* növekedni kezd, a Föld planétáris albedója is növekszik, és amint már említettük, az albedó 1%-os növekedése kb. 1 fokal lehűlést eredményez az egyensúlyi hőmérsékletben. A lehűlés miatt tovább terjeszkedik a jégtakaró, tovább nő az albedó és tovább csökken a hőmérséklet. Ezt az önmagát erősítő folyamatot nevezik *pozitív visszacsatolásnak* (v.ö. 7.3. alfejezet).

Az egyik legmarkánsabb éghajlatalakító kölcsönhatás a *hidroszféra* és a légkör között játszódik le. Természetesen itt is többes számban: kölcsönhatásokról kell beszélnünk, mivel ezek különböző formában jelentkeznek. A Föld a naprendszer bolygói és holdjai között az egyetlen, amelyen a víz *három halmazállapotban van jelen*: vízgőz, cseppfolyós víz és fagyott víz (hó, jég) formájában. Növekvő léghőmérséklettel növekszik a párolgás, több lesz a levegő vízgőztartalma, vastagabb, kiterjedtebb lesz a *felhőzet*. A felhőzet vastagodásával és kiterjedésével megnövekszik a

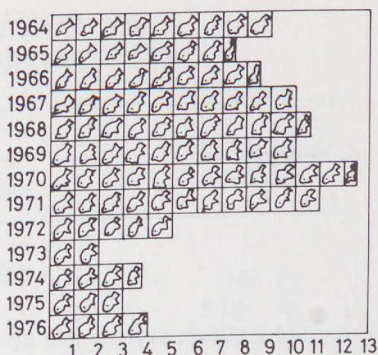
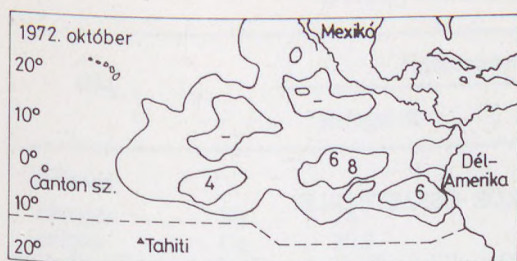
Föld albedója, tehát kevesebb napsugárzás jut le a talajfelszínre. Másrészt a felhőzet csökkenti az éjszakai földi kisugárzást és a lehűlést. A két, egymással ellentétes hatás egyes területeken lehűléshez, máshol melegedéshez vezet. Műholdas megfigyelések szerint az óceánokon a szubtrópusi és közepes szélességeken inkább a hűtőhatás, a szárazföldek egyes területein és a szubpoláris zónában a melegedés a jellemzőbb. Összességében a felhőzet növekedése inkább hűtő, mint melegítő hatású.

A víz párolgása a felszínről *hőt von el*, ugyanakkor a légkörben a *vízgőz kicsapódásakor hő szabadul fel* (latens hő), ennek legnagyobb része a légköri mozgások energiáját erősíti. Kiszámították, hogy a vízgőz nélküli légkörben (tehát kondenzációs hőfelszabadulás nélkül) a felszálló légmozgások mintegy tízszer gyengébbek lennének. Másrészt az a latens hő, ami három jól kifejtett mérsékeltövi ciklonban felszabadul felhő- és csapadékképződéskor, elegendő az általános légkörzés mozgási energiájának fenntartásához. Így a víz körforgása jelentősen hozzájárul a *légkör energiagazdálkodásához*. Meg kell jegyeznünk, hogy a szárazföldi élet számára nélkülözhetetlen *édesvíz* a folyókban és a lefolyásos tavakban közvetlenül a csapadék-hullásnak, közvetve a *víz körforgásának köszönhető*.

Az év nagy részében *állandó irányú légáramlások*, elsősorban a passzátszelek hozzák mozgásba a *tengeráramlásokat*. A tengeráramok a szárazföldek partjainál eltérülnek: egy részük az alacsony szélességek felől meleg vizet, vagyis hőt szállít a magasabb szélességek felé, ezek a meleg áramlások (Golf-, Kuro Shio-, Brazíliai-, Kelet-Ausztráliai-, Agulhas-áramlások); más részük a magasabb szélességek felől hideg áramlásként tart az alacsonyabb szélességek felé, és hűtő hatást fejt ki (Labrador-, Kaliforniai-, Oja Shio-, Perui- v. Humboldt-áram, Benguela- és Nyugat-Ausztráliai-áramlás). A meleg vagy hideg tengeráramlások melegítik vagy hűtik a fölöttük lévő levegőt, mint erről a 3. fejezetben már szó volt (az AMTEX alprogram ismertetésekor), ezáltal közvetve befolyásolják a légköri mozgásokat.

Minél *hidegebb a tenger*, annál *több gázt*, szén-dioxidot, oxigént *tud befogadni*. Az oxigéndús hideg tengeráramlások ezért algákban, apró tengeri élőlényekben gazdagok, ide gyűlnek az ezekkel táplálkozó halak. A Perui- vagy Humboldt-áramlás népes halrajokat vonz Dél-Amerika partjai közelébe. Peru és Észak-Chile lakosságának fő jövedelmi forrása a halászat, a világ halfeldolgozó ipari termékeinek jelentős része innen kerül ki. Azokban az években, amikor a Humboldt-áramlás gyenge, a tengerfelszín a szokottnál melegebb, a halfogás visszaesik (8. ábra).

A tenger hullámozgásakor apró vízcseppek kerülnek a levegőbe, amelyek hamar elpárolognak, a bennük oldott sókristályok a légkörben maradnak. Ezek túl picik ahhoz, hogy visszahulljanak a tengerbe, a légáramlások a magasba emelik őket. Ezek a *parányi sókristályok* nedvszívóak, így igen alkalmasak arra, hogy a vízgőz kicsapódják rájuk, tehát *nedvszívó kondenzációs magvak*. A légköri vízgőz ui. mindig valamilyen szilárd anyagra, a szabad légkörben a kondenzációs magvakra csapódik ki. A kontinensekre jellemzőek a kéntartalmú magvak, az óceánokra a kloridok. A kontinentális kondenzációs magvakra kicsapódó vízgőz többnyire apró vízcseppekkéket alkot, ezek képesek hosszú ideig felhőként a levegőben maradni. A tengeri



8. ábra. A tengerfelszín hőmérsékletének többlete a sokévi átlaghoz képest a Dél-Csendes-óceánon 1972 októberében, El Nino-s évben és a perui halfeldolgozás évi terméke millió tonnában 1964–1976 között. Figyelemre méltó a drasztikus visszaesés 1972–73-ban az El Nino következtében

kondenzációs magvak között sok a nedvszívó, ezek gyorsabban növekszenek és el-
 érik azt a méretet, amikor tömegüknel fogva kihullanak, esőként a talajra kerülnek.

A litoszféra-légkör, a hidroszféra-légkör kölcsönhatások tehát nemcsak energia-
 áramlást, hanem anyagcserét is magukban foglalnak. A víz körforgása, valamint a
 hidroszféra és a légkör kölcsönhatásai már érintik az élővilággal való kapcsolatot is.
 A földi élet függ a hőmérséklettől, a levegő és a víz összetételétől. Másrészt a légkör
 összetételét az élővilág döntő módon befolyásolja, amint erről még bőven lesz szó a
 következő fejezetekben, hiszen ez korunk éghajlatkutatásának egyik központi prob-
 lémája.

Az eddigi vázlatos összefoglalás alapján is megállapíthatjuk, hogy *a Föld a szó-
 teljes értelmében élő bolygó*. Eleven geológiai erők, vulkánok, hegyképző erők
 működnek rajta, változtatva a légkör összetételét és a felszín alakját. A víz három
 halmazállapotban és nagy bőségben megtalálható a felszínén és a légkörében; a víz
 körforgása, a hidrológiai ciklus gondoskodik édesvízkészletekről és öntözésről a
 kontinenseken. A felhőzet „szabályozza” bizonyos mértékig a Föld albedóját és
 ezáltal egyensúlyi hőmérsékletét. A földi *élővilág* „hasznélvezője” a kialakult ég-
 hajlatnak, de mint látni fogjuk, aktív formálója is a légkör összetételének és újabb
 felfogások szerint az éghajlatnak is.

5. AZ ÉGHAJLAT-INGADOZÁSOK ANTROPOGÉN OKAI

5.1. A LÉGKÖR ÖSSZETÉTELE

A Föld légkörét számos gáz keveréke alkotja. Ezeket a gázokat osztályozhatjuk *tartózkodási idejük* alapján, de *relatív mennyiségük* szerint is. A tartózkodási idő alatt azt az időt értjük, amelyen keresztül a légkör adott összetevője lecserélődik, illetve kiürül és újra keletkezik. Eszerint a gázok valahol termelődnek és bekerülnek a légkörbe, máshol elnyelődnek. Az előbbiek a gázok forrásai, az utóbbiak a nyelői. Ha ismerjük egy gáz össztömegét a légkörben, valamint a termelődési vagy elnyelési sebességét, akkor ezen mennyiségek állandóságát feltételezve kiszámítható a gázok átlagos tartózkodási ideje.

A tartózkodási idő alapján a légköri gázokat három kategóriába sorolhatjuk:

1. erősen változékony gázok, amelyek tartózkodási ideje néhány nap vagy hét,
2. változó mennyiségű gázok néhány éves vagy évtizedes tartózkodási idővel,
3. állandó gázok jóval hosszabb tartózkodási idővel.

A légköri gázok relatív mennyiségük szerint lehetnek *fő összetevők* (N_2 , O_2 , Ar, CO_2), illetve kis koncentrációjú *nyomgázok* (II. táblázat). A gázokon kívül a levegőben számos diszperz állapotú szilárd és cseppfolyós anyag, ún. *aeroszol* részecske található. Ezek mennyisége kicsiny a levegő összes tömegéhez viszonyítva, szerepük mégis fontos a légkör áteresztőképessége szempontjából és mint az előzőekben láttuk, a csapadékképződéskor. Ennek során kondenzációs magvak szerepét játszhatják.

A légkör összetétele csak az alsó kb. 85 km-es rétegben állandó, ezért ezt a réteget *homoszférának* nevezzük, megkülönböztetésül a fölötte lévő *heteroszférától*, amelyben az összetétel változik a magassággal. Az alsó 85 km-es rétegben, vagyis a homoszférában található a légkör össztömegének 99,999%-a. Így a továbbiakban a légköri gázok és aeroszol részecskék tanulmányozását a homoszférára korlátozzuk.

A légkör összetétele a Föld sugárzásháztartásának fontos tényezője. Az egyes gázok ui. bizonyos hullámhosszúságú sugarakat elnyelnek, más sugárzást átengednek.

Hogy a sugárzás elnyelésével kapcsolatos légköri folyamatokat jól megérthessük, először a sugárzás legfontosabb törvényeivel kell megismerkednünk. Erre azért is szükség van, mert ezek a folyamatok éghajlatunk kialakításában döntő szerepet játszanak.

Minden test, amelynek hőmérséklete magasabb az abszolút zérus foknál ($-273^\circ C$), elektromágneses sugárzást bocsát ki. A sugárzás erőssége a hőmérséklet

II. táblázat
A levegőt alkotó gázok a talajközeli légrétegekben

Gáz	Koncentráció		Tartózkodási idő
	térfogat-%	ppm	
Állandó			
nitrogén	N ₂	78	10 ⁶ év
oxigén	O ₂	20,9	5·10 ³ év
argon	Ar	0,934	—
neon	Ne	18,18	—
hélium	He	5,24	10 ⁷ év
Változó			
szén-dioxid	CO ₂	350	15 év
metán	CH ₄	2	4 év
hidrogén	H ₂	0,5	6,5 év
ózon	O ₃	(0-5)·10 ⁻²	2 év
Erősen változó			
vízgőz	H ₂ O	40-40000	10 nap
szén-monoxid	CO	(1-20)·10 ⁻²	4 hónap
nitrogén-dioxid	NO ₂	(0-3)·10 ⁻³	6 nap
ammónia	NH ₃	(0-2)·10 ⁻²	7 nap
kén-dioxid	SO ₂	(0-2)·10 ⁻³	4 nap

K-ben megadott értékének negyedik hatványával arányos. A Nap kisugárzó felszíne, a fotoszféra hőmérséklete kerekén 6000 K, a Föld átlaghőmérséklete 287 K, a naphőmérséklet tehát 20,9-szer magasabb a földfelszín hőmérsékleténél, ezért 20,9⁴-szer, azaz 191 019-szer erősebb sugárzás hagyja el a Nap felszínét, mint a Földét felület-egységenként, azaz m²-enként.

Az elektromágneses sugárzás teljes spektruma az igen rövidhullámú gamma-sugárzástól a hosszúhullámú rádiósugarakig terjed (III. táblázat).

Minél melegebb egy test, annál rövidebb hullámhosszon sugároz ki maximális erősséggel. A Nap 6000 K hőmérsékletű fotoszférája 0,48 μm hullámhosszon sugároz ki legerősebben, ez a zöld színnek felel meg. A Föld 287 K átlaghőmérsékletű felszínéről kibocsátott legerősebb sugárzás hullámhossza 10 μm, azaz infravörös vagy hő-sugárzás.

A tiszta, gázokból álló levegőben a kék szín szóródik a legerősebben, ezért látjuk a tiszta (sarkvidéki, tengeri eredetű) levegőt mélykéknek. Az aeroszol részecskék méretüktől függően más-más színt szórnak erősebben, ezért minél szennyezettebb a

III. táblázat
Az elektromágneses sugárzás spektruma

Név:	Gamma	Röntgen	UV (ultraviola)
Hullámhossz:	0,01 nm	0,01–100 nm	0,02–0,4 μm

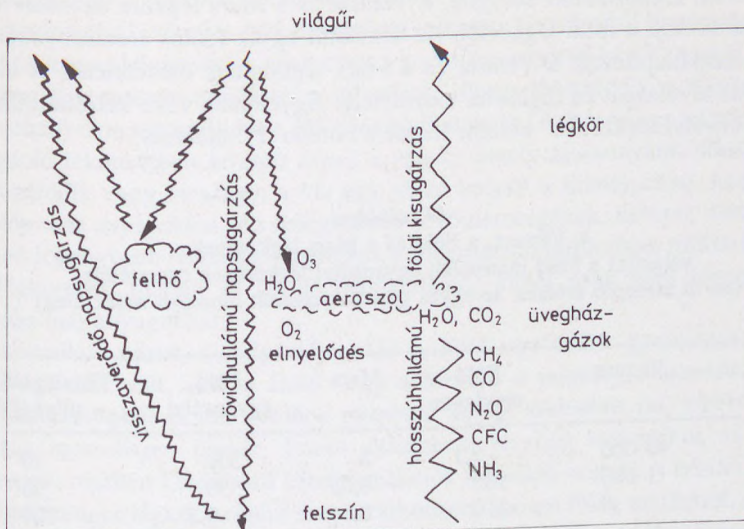
Név:	Látható fény kék vörös	Infravörös, hősugárzás	Rádióhullámok
Hullámhossz:	0,4–0,8 μm	0,8–1000 μm	1 mm – 1 km

Jelölések: nm = nanométer (10^{-9} m), μm = mikrométer (10^{-6} m)

levegő, annál világosabb, szürkébb az ég színe. A légkör nélküli Holdon az ég fekete, amint ezt az Apollo űrhajók legénysége által készített felvételek is mutatják.

A légkörön áthaladó napsugárzás egy része elnyelődik, és a levegő melegítésére fordítódik. A sztratoszférában, 20–50 km magasságban lévő *ózon a 0,3 μm -nél rövidebb sugárzást* gyakorlatilag *elnyeli*, ezért az élőlényeket roncsoló ultraviola sugárzás nagy része nem jut le a földfelszínre. A többi légköri gáz azonban a rövidhullámú napsugárzás nagy részét átengedi, csupán a vízgőznek és oxigénnek vannak keskeny elnyelési sávjai a látható fény tartományában. Az infravörös illetve hősugárzás tartományában a II. táblázatban felsorolt gázok közül elnyelési sávjai vannak a vízgőznek, a szén-dioxidnak, a szén-monoxidnak, a metánnak, a nitrogén-dioxidnak, az ammóniának. Ezek tehát elsősorban vagy kizárólag a hosszúhullámú földi kisémisszót nyelik el, a rövidhullámú napsugarakat átengedik. Ebben rejlik az üvegházhatás. Ezért hívják a felsorolt gázokat (a rövidhullámú sugárzás egy részét is elnyelő víz kivételével) „*üvegházgázoknak*”. Az említetteken kívül üvegházhatású gázok még a troposzférikus ózon és a mesterségesen előállított freonok is.

A gázösszetevők és a légköri aeroszol szerepét a sugárzásháztartásban a 9. ábra szemlélteti. Az emberi tevékenységtől jórészt független a légköri vízgőz, az oxigén és a felhőzet, legalábbis globális méretekben. Az emberi tevékenység erősen befolyásolja a légkörben lévő aeroszolt, nitrogén-oxidokat, szén-dioxidot, szén-monoxidot, metánt, ammóniát és egy mesterségesen előállított gáz mennyiségét. Ez a gáz a köznap életben emlegetett freon, másként *halogénezett szénhidrogén* (CFC). Nevét onnan kapta, hogy a metánban (CH_4) lévő hidrogénatomokat klór- vagy fluor-atomokkal helyettesítik. Hűtőberendezésekben és szórópalackokban alkalmazzák.



9. ábra. A különböző légköri gázok és az aeroszol hatása a beérkező rövidhullámú napsugárzásra, illetve a hosszuhullámú földi kisugárzásra

A freongázok fontos tulajdonsága, hogy kémiaiilag semlegesek, nem bomlanak szét és nem lépnek vegyi reakcióba más légköri gázokkal. Ez az előnyük, de egyúttal ebben rejlik veszélyességük is. A légkörbe ugyanis évente ezer tonna számrá bejutva sokáig megmaradnak, és egyre nagyobb mennyiségben összegyűlnek. A légköri kavargó mozgások, elsősorban a zivatarfelhőkben uralkodó heves förláramlások nagy magasságokba juttatják ezeket a gázokat, sőt följutnak a sztratoszférába is. Itt a Nap ultraibolya sugárzásának hatására a freonmolekulából leválik egy klóratom, amely az ozonmolekulával (O_3) találkozáva, abból leszakít egy oxigénatomot. A keletkező klór-monoxid nem stabil, egy szabad oxigénatom leszakítja az oxigént és O_2 -vé alakul, míg a klór szabaddá válik és újabb ozonmolekulát bont szét. Ezért egyetlen freonmolekula ozonmolekulák ezreit képes lebontani.

Felismerve ezt a káros hatást, az Egyesült Államokban a 60-as, 70-es évektől kezdve fokozatosan betiltották a freonok gyártását és forgalmazását.

A légkör fő összetevői közül a nitrogén és az oxigén együttesen a levegő csaknem 99%-át alkotják. Ebben különbözik a földi légkör a naprendszer összes többi bolygójának légkörétől. Az óriásbolygók, a Jupiter, a Szaturnusz, az Uránusz légkörének fő alkotó gázai a H_2 és He könnyű gázok. Azért nem szöknek meg, mert egyrészt az óriásbolygók tömege sokszorosa a Földének, így az erős gravitáció fogva tartja őket, másrészt az alacsony hőmérséklet miatt a molekulák és atomok lassabban mozognak, nehezen „szöknek meg” a légkörből.

A Földhöz legközelebbi bolygók, a Vénusz és a Mars légköre azonban szintén erősen különbözik a földi légkörtől. Az űrkutatás egyik fontos eredményeként elég pontosan megállapították a Vénusz és a Mars légkörének összetételét. A bolygók Naptól vett távolságát és légkörük összetételét figyelembe véve kiszámították: milyen „egyensúlyi légkörnek” kellene lennie a Földön (IV. táblázat).

IV. táblázat
A Vénusz, a Föld és a Mars légköreinek,
valamint a Föld interpolált egyensúlyi légkörének összetétele
(az itt szereplő értékek az egyes gázok nyomását mbarban adják meg)

Gáz	Vénusz	Föld tényleges	Mars	Föld egyensúlyi	Tényleges/egyen- súlyi (Föld)
CO ₂	90 000	0,3	5	300	10 ⁻³
N ₂	1 000	780	0,05	30	26
O ₂	0	210	0,1	0,3	700
Összes	~91 000	~1000	~5	~330	–

Látható, hogy a Vénusz felszínén nagy, míg a Mars felszínén kicsiny légköri nyomás uralkodik. A légkör azonban mindkét bolygónál főleg szén-dioxidból áll és oxigén vagy egyáltalán nincs, vagy csupán nyomokban található. Ezzel szemben a Föld légkörét nitrogén és oxigén alkotja, míg a CO₂ elhanyagolható benne. Szembetűnő, hogy mennyire eltér a tényleges légkör gázösszetevőinek értéke az egyensúlyi légkörtől. A szén-dioxid ezerszer kevesebb a valóságban, mint a számított egyensúlyi légkörben. A nitrogénből 26-szor, az oxigénből 700-szor több található a földi légkörben a számítottnál.

Szinte önmagától kínálkozik a kérdés: milyen kapcsolat van az életet egyetlen bolygóként hordozó Föld sajátos légkörének összetétele és az élővilág között? Vajon a szén-dioxidban szegény, oxigénben gazdag légkör tette lehetővé a földi élet kialakulását, vagy megfordítva: az élővilág alakította ki a Föld különleges légkörét? Sokáig azt gondolták, hogy előbb a légkör alakult az élet számára elviselhetővé, csak azután jelent meg az élővilág. Az újabb kutatások ezt a nézetet egyre vitatottabbá teszik. A továbbiakban bőven fogunk ezzel a kérdéssel foglalkozni.

5.2. AZ ÉLET MEGJELENÉSE A FÖLDÖN

A naprendszer és ezen belül a bolygók élettörténetének tartamát milliárd években, röviden *eonok*ban szokták mérni. A Föld önálló égitestként 4,5 eonnal ezelőtt kezdte meg életét. Minthogy a világmindenség anyagának túlnyomó részét H₂ és He alkotja,

ezért az ősbolygók légkörét, közöttük a Földét is kezdetben főleg H_2 és He, továbbá CH_4 (metán), H_2O (vízgőz), NH_3 (ammónia) alkotta. Az aránylag kicsiny gravitációs vonzás és magas hőmérséklet miatt ezek a kozmikus eredetű gázok, vagyis az *őslégkör gázai* fokozatosan elszöktek a világűrbe, *disszipálódtak*. Ez a folyamat száz- vagy néhányszor százmillió év alatt játszódhatott le. A kozmikus gázok között a disszipáció tekintetében *kivételt képez a vízgőz*, amely alacsonyabb hőmérsékleten kondenzálódik vagy megfagy, a víz egy része beépül a kristályokba, kémiai reakcióba lép más anyagokkal. Az őslégkörben lévő nemesgázok, hélium, neon, kripton és xenon legnagyobb része disszipálódott, a megmaradó milliomod, milliárdod rész a Föld légkörében maradt és ma is megtalálható, mivel ezek nem lépnek kémiai reakcióba más anyagokkal.

A kozmikus gázok disszipációja után a Föld egy időre gyakorlatilag légkör nélküli égitestté vált, akár a Hold vagy a Merkúr a jelenlegi naprendszerben. A szilárd földkéregből ezután számos gáznemű anyag szabadult fel, amelyekből kialakult a *másodlagos légkör*. Ennek összetevői részben vulkanikus és termikus folyamatok, részben különböző kémiai reakciók termékei voltak. A kezdeti szakaszban a másodlagos légkör oxigént nem tartalmazott, hanem főleg metánból, ammóniából és vízgőzből állt. Később megjelent a szén-dioxid, a nitrogén és a kén-dioxid. A Föld felszínének hőmérséklete ekkor -10 és -15 °C között ingadozott. A hőmérsékletet a napállandó és a Föld planetáris albedója határozta meg. A csillagászok napjainkban többé-kevésbé egyetértenek abban, hogy a Nap három és fél eonnal ezelőtt a jelenleginél gyengébb fényű csillag volt, így a napállandó ez idő alatt kb. 30%-kal nőtt. Ha ez igaz, akkor a Földre sokkal kevesebb hő jutott, és a Föld hőmérsékletének is alacsonyabbnak kellett lennie.

Ennek ellenére föltételezhetjük, hogy *az élet indulásakor*, 3,5 eonnal ezelőtt a földi átlaghőmérsékletnek fagyponthoz kellett lennie. Ezért vagy az albedó volt kisebb a jelenleginél, vagy az üvegházhatás volt erősebb, vagy mind a két hatás egyidejűleg érvényesült. A Föld jelenlegi albedója, amint erről korábban már szó volt: 0,3, azaz 30%. A *felhőzet nélküli* Merkúr albedója 5,8%, a Holdé 7%, a csekély felhőzetű Marsé 17%, míg az igen *sűrű felhőzetű* Vénuszé 70,5%, a Jupiteré 73%, a Szaturnuszé 76%. Nyilvánvaló, hogy egy bolygó vagy hold albedója erősen függ felhővel borítottságától. A felhőzet nélküli Föld albedója tehát valószínűleg jóval kisebb volt, mint a felhőzet megjelenése és kiterjedése után.

A másik hőmérséklet-növelő tényező a *légkör üvegházhatása*. A metán, a szén-dioxid és a vízgőz a földi, hosszúhullámú kisugárzás jelentős részét elnyeli, tehát ezen gázok jelenléte a 3,5 eonnal korábbi légkörben hozzájárulhatott a földi hőmérséklet emeléséhez. Amikor a hőmérséklet elérte a 0 °C-ot és a vízgőz nyomása a 6,1 mbar értéket, megkezdődött a vízgőz kondenzációja. Ekkor alakulhattak ki az óceánok a Földön.

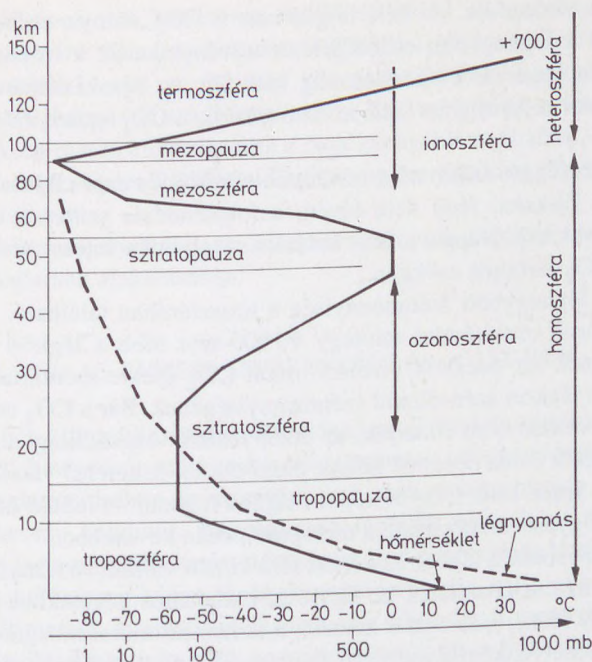
Az oxigén nélküli légkör áteresztí a Nap ultraviola sugárzását, ez a sugárzás pedig szétroncsolja az élő sejteket. Mégis sokan úgy vélik, hogy az UV sugárzás indított el olyan kémiai folyamatokat, amelyek során az élőlények építőanyagai (cukrok,

aminosavak) kialakultak. Bár laboratóriumi kísérletek során eddig nem sikerült minden kétséget kizáróan bebizonyítani az úgynevezett „ősleves” UV sugárzás vagy elektromos kisülés (villámlások) útján való létrejöttét, el kell fogadnunk a tényt, hogy az élet első, kezdetleges formái 3,5 eonnal ezelőtt jelentek meg a Földön. Kezdetben csak a 10 méternél nagyobb vízmélységben maradhatott meg az élet, ugyanis a gyilkos UV sugárzás idáig nem hatol le. A tengerekben és az elegendően mély vizekben tehát szaporodni kezdtek az élőlények, egy részük CO_2 -ot fogyasztott és O_2 -t termelt.

Az élővilág megjelenése után évmilliárdok elteltével oxigén került a légkörbe, bár a légköri oxigénmennyiség sokáig igen csekély volt, még 2 eonnal ezelőtt is a jelenlegi szintnek alig egy ezredrészét tette ki. A jelenlegi légköri mennyiséget angol rövidítéssel PAL-nak (Present Atmospheric Level) nevezik. A légköri oxigén kb. 600 millió évvel ezelőtt a PAL 1%-át, 400 millió éve a PAL 10%-át érte el. Az oxigén megjelenésével megindult az O_3 , azaz az ózon keletkezése is. Az egyébként könnyen bomló háromatomos oxigénmolekulák a Nap UV sugárzásának közreműködésével jönnek létre. Az ózon megmaradása tehát föltételezi az állandó újratermelődését. Ha ugyanannyi ózon keletkezik adott idő alatt, mint amennyi elbomlik, akkor az ózonmennyiség állandósul. A fotokémiai ózontermelődés meghatározott oxigénsűrűség-nél maximális. Ezért kis oxigénkoncentráció esetén az ózon a talajközeli rétegekben keletkezik és halmozódik, amint növekszik a légkör oxigéntartalma, az ózonkeletkezés a magasabb rétegek felé tolódik. A kialakuló ózonréteg magassága ezért arányos a légköri oxigén mennyiségével. Jelenleg a légköri ózon túlnyomó része a 20–50 km közötti magasságban található (10. ábra).

A légkör oxigéntartalma a legutolsó 600–800 millió évben egyre erőteljesebben növekedett, eközben kialakult egy ózonréteg, amely eleinte a talajközeli rétegekben helyezkedett el, majd fokozatosan a magasabb szintekbe emelkedett. Ez az ózonréteg védőpajzsot alkotott a Nap UV sugarai ellen, s ez lehetővé tette az élet elterjedését a szárazföldeken is. A magasba emelkedett ózonrétegnek, ozonoszférának igen nagy jelentősége van a légkör hőmérsékleti rétegződését illetően. Ismeretes, hogy a levegő hőmérséklete a talajtól fölfelé a troposzféra felső határáig csökken, a tenger szintjén átlagosan $+14^\circ\text{C}$, a troposzféra felső határán -50 , -60°C . A sztratoszféra alsó részén a hőmérséklet keveset változik a magassággal, a felső részén már kissé emelkedik. Ez az *inverzió*, a hőmérsékletnek a magassággal való emelkedése az ozonoszférának köszönhető, hiszen az O_3 elnyeli a UV sugarakat és emiatt emelkedik itt a hőmérséklet. Sztratoszférája a bolygók közül egyedül a Földnek van.

A troposzféra és sztratoszféra határán, a tropopauzában uralkodó alacsony, -50 , -60°C hőmérséklet az ún. „vízgőzcsapda” szerepét játssza. Ez abban áll, hogy a föl-emelkedő nedves levegő a tropopauza közelébe érve annyira lehűl, hogy a benne lévő vízgőz csaknem teljesen kicsapódik, sőt kifagy belőle. Így a sztratoszférába és a még magasabb légrétegekbe gyakorlatilag elhanyagolható mennyiségű vízgőz kerül. A sztratoszférában pedig az inverzió miatt függőleges mozgások nehezen alakulhatnak ki. Mindez megakadályozza a vízgőznek a világűrbe való elszökését.



10. ábra. A légkör függőleges szerkezete

A következő fontos kérdés: hova tűnt a légkör jelentős hányadát kitevő szén-dioxid? Számos kutató úgy vélekedik, hogy 3 eonnal ezelőtt a légkör CO_2 -tartalma 10 PAL volt. A szén-dioxid csökkenésének egyik okát abban látják, hogy 300°C -nál alacsonyabb hőmérsékleten a légköri CO_2 jelentős része kémiai reakciókkal elsősorban az óceánokban *karbonátos kőzeteket* hoz létre, ezáltal csökken a légkör szén-dioxid-tartalma. Megjegyezzük, hogy a Vénusz felszíni hőmérséklete meghaladja a 400°C -ot, ezért a sűrű és túlnyomórészt CO_2 -ból álló légköre meg tudja tartani szén-dioxid-tartalmát.

A földi légkör CO_2 koncentrációjának csökkenése másrészt a bioszféra megjelenésével magyarázható. A fotoszintézissel ui. a növények a levegőből szén-dioxidot vesznek fel, és oxigént tesznek szabaddá. Így a geológiai korok folyamán a légkör szén-dioxid-tartalmának csökkenését az oxigénarány növekedése kísérte. A növények életműködésének hatását a légkör CO_2 -tartalmára jól mutatja ez utóbbi napi és évi menete. Az északi félgömbön, ahol a növényzet zöme a mérsékelt és magasabb szélességeken található, vagyis azokon a területeken, amelyeken az évszakok változása jól érzékelhető, a CO_2 a vegetációs időszak során csökken, és minimumát ősszel éri el. Ez az évi ingadozás a talajhoz közeli légrétegekben a legerősebb,

fölfelé haladva elmosódik. A déli félgömbön a CO_2 aránya egész éven át alig változik, mivel a legnagyobb erdőségek és növénytakarók a trópusi övben találhatók, ahol a napsugárzás év közben alig változik. Az északi félgömbön a téli hónapokban, amikor a növényzet „pihen”, növekszik a CO_2 arány, és tavasszal éri el maximumát.

Hasonló összefüggés található a növényi életműködés napi ciklusa és a CO_2 napi menete között. Éjszaka, fény nem lévén, a fotoszintézis szünetel, a CO_2 légköri mennyisége növekszik. Nappal a fény hatására megindul a fotoszintézis a növényekben, a légkör CO_2 -tartalma csökken.

A Földön a legnagyobb szénmennyiség a litoszférában található. A kőzetekben, ásványokban tárolt szénkészlet mintegy 40 000-szer több a légköri CO_2 -ban lévő szénmennyiségnél. Az óceánok vizében oldott CO_2 illetve széntartalmú anyag kb. hatvanszorosa a légköri szén-dioxid szénmennyiségének. Bár a CO_2 cserefolyamatok mennyiségét pontosan nem ismerjük, az bizonyosnak vehető, hogy a legintenzívebb CO_2 csere a légkör és az óceánok között játszódik le. Ismeretes viszont, hogy minél hidegebb a víz, annál több CO_2 -ot képes magába fogadni. A lehűlő óceán tehát több szén-dioxidot fogyaszt a légkörből, a melegebb óceán kevesebbet.

A földtörténet során a légkör és a litosféra között váltakozó irányú és intenzitású CO_2 cserefolyamatok játszódtak le. Egyrészt karbonátos kőzetekben megkötődött a légköri CO_2 egy része, másrészt e kőzetek a lemeztektonikai mozgások következtében időnként és helyenként a mélyebb földrétegek felé gyűrődtek, ahol fölmelegedtek, a CO_2 gáz kiszabadult, és a vulkáni tevékenység révén visszakerült a légkörbe. Ez magyarázhatja azt, hogy egyes földtörténeti korszakokban a légkör CO_2 -tartalma jelentősen megnőtt, mint például a korai Karbon (kb. 320–350 millió éve), korai Perm (260–280 millió éve) idején. Ilyenkor a globális hőmérséklet is megemelkedett néhány fokkal. Más időszakokban a légköri CO_2 csökkent, mint pl. a késői Kambrium idején (480–520 millió éve), de leginkább az Oligocén korban (20–30 millió éve) és a Pliocénben (1–3 millió éve); ezzel párhuzamosan a Föld átlaghőmérséklete is alacsonyabb lett.

További megoldásra váró probléma a földi légkör feltűnően nagy nitrogéntartalmának eredete. A Vénusz és a Mars légkörében jóval kisebb a nitrogén aránya (IV. táblázat), ezért a Föld légkörében lévő nitrogénmennyiség erősen eltér a geokémiai egyensúly alapján várható értéktől. A nitrogénnek a légkörben történt felhalmozódását és fennmaradását a biosféra működésével magyarázhatjuk. Bár a biosféra és a légköri nitrogén kapcsolatára különböző kutatók több elméleti lehetőséget is felsorakoztattak, a pontos mechanizmust nem ismerjük.

Végül ejtsünk szót a légköri metánról (CH_4), amelynek aránya ugyan csekély, mindössze 2 ppm (milliomodrész), megmaradása mégis kapcsolatban áll az élővilággal. A metán és az oxigén ugyanis a napfény hatására szén-dioxiddá és vízgőzzé alakul. Ha a biomaszában nem termelődné állandóan metán, akkor egy idő után teljesen eltűnné a légkörből. Ismeretes, hogy metán egyes élő szervezetek bomlása-kor vagy azok melléktermékeként kerül a levegőbe.

A Föld légkörének mai összetétele és hőmérsékleti rétegződése (sztratoszféra, vízgőzcsapda) annyira eltér a naprendszer többi bolygójának légkörétől, hogy ezt aligha lehetne mással, mint az élővilág közreműködésével magyarázni. A légkör összetétele az üvegházgázok arányának változtatásával szabályozza a Föld hőmérsékletét is, szükség esetén ellensúlyozza a Nap gyengébb sugárzását, megakadályozva a túlságosan nagy mértékű lehűlést. Erről a nagyon izgalmas témáról a 7. fejezetben lesz bővebben szó.

Előbb azonban vizsgáljuk meg az emberi tevékenység szerepét a légkör összetételének és az éghajlatnak alakulásában.

5.3. AZ EMBERI TEVÉKENYSÉG ÉS A LÉGKÖR

A 2. fejezetben kifejtettük, hogy a 20. század az emberiség történetében példátlan fejlődést hozott. A népesség száma soha nem tapasztalt növekedésnek indult, az általános jólét megteremtéséhez az egy főre jutó energiafelhasználás minden eddigi méretet sokszorosan felülmúl. Az elegendő táplálék biztosítása egyre fejlettebb mezőgazdasági technológiák elterjesztését igényli. Az emberiség hosszú évezredekig az élővilágnak különleges képességekkel megáldott tagja volt ugyan, de tevékenysége korlátozott maradt, a természet egészét alig érintette. A mennyiségi változások azonban új megvilágításba helyezték az ember aktivitását, a fejlett ipari országokban aggódni kezdtek a természeti környezet megmaradásáért, megalakultak a *természetvédő szervezetek*. Elmondhatjuk, hogy teljes joggal. Ijesztő hírek érkeztek és még ma is érkeznek a folyók, tavak szennyezéséről. A vizek élővilága pusztul, vagy már el is pusztították. A vegyi anyagok gyártása fejlődött, de az ember nem fejlődött gondolkodásában, előrelátásában. A hulladék anyagok, el nem használt vegyszerek gondatlan kezelés folytán megmérgezték a talajt, a kutak vizét.

A növekvő ipari és mezőgazdasági termelés, de nem utolsósorban a motorizált közlekedés a légkört sem kíméli. Vegyük sorba azokat az anyagokat, amelyek az emberi tevékenység folytán, tehát antropogén forrásokból kerülnek a légkörbe, nem zárva ki azt, hogy ezek egy része természetes forrásokból is ered. Az *V. táblázat* összeállításában nem törekedtünk teljességre, csupán az általunk fontosnak ítélt hatások kiemelése volt a cél.

A táblázat első két helyén szerepelnek a nitrogén-oxidok (N_2O , NO_2 , NO) és a kén-dioxid. Mindkettőből több millió, illetve százmillió tonna kerül évente a légkörbe, ahol egy részükből savas eső keletkezik. A savas esők pusztítása érzékelhető és közzismert: a műemlékek erősen rongálódnak, a fémek korrodálódnak, a fák, erdők megbetegednek és fokozatosan pusztulnak.

Az 50-es, 60-as években az éhínség elleni küzdelem egyik nélkülözhetetlen eszköze a műtrágya minél nagyobb mértékű felhasználásában látták. A műtrágyák egyik fontos alapeleme a nitrogén. Egyes országokban a nitrogéntartalmú műtrágyagyártást egy-másfél évtized leforgása alatt ötszörösére növelték, eközben egyre

V. táblázat
Az emberi tevékenység által a légkörbe juttatott anyagok

Megnevezés		Antropogén forrás	Hatása a légkörben
Nitrogén-oxidok	NO _x	közlekedés, repülőgépek, műtrágyagyártás	salétromsav képződés, savas esők, ózonbontás, szmogkeletkezés
Kén-dioxid	SO ₂	fosszilis anyagok égetése, közlekedés	kénsav képződés, savas esők
Szén-monoxid	CO	fosszilis anyagok égetése, közlekedés	egészségártalom (üvegházhatás)
Szén-dioxid	CO ₂	fosszilis anyagok égetése, közlekedés	üvegházhatás
Metán	CH ₄	rizstermesztés, szarvas-marha-tenyésztés	üvegházhatás (oxigén szabályozás)
Halogénezett szén-hidrogének, freonok	CFC	hűtőberendezések, sprayk	ózonbontás (üvegházhatás)
Ólom	Pb	gépjárművek	egészségártalom
Aeroszol		ipar, közlekedés	a légkör sugárzásáteresztő képességének csökkentése (lehűlés)
Ózon a talaj közeli levegőben	O ₃	közlekedés, ipar	egészségártalom, növények károsodása (üvegházhatás)

nagyobb mennyiségű nitrogén-oxid került a levegőbe. Ezen országok egyike Görögország és talán nem egészen véletlen, hogy éppen itt és éppen ekkor kezdték tapasztalni a pótolhatatlan értékű ókori műemlékek rongálódását. A téli esőzések idején ezért kénytelenek fóliával burkolni Athén egyik leghíresebb műemlékét, az Akropoliszt, hogy megóvják a savas esők pusztításától. Megjegyzendő azonban, hogy a járműforgalom növekedése legalább annyira hozzájárul a görög műemlékek rongálódásához, mint a savas esők.

Nitrogén-oxidok kerülnek a levegőbe a repülőgépek kipufogógázaiában is. Különösen veszélyes lehet az ozonoszféra épségben maradása szempontjából a sztratoszférában közlekedő szuperszonikus repülőgépek számának gyarapodása. Ismeretes, hogy minden repülőgépnek, sebességétől függően, meghatározható az optimális

repülési magassága. A légellenállás ui. a sebesség négyzetével arányos. Általában minél nagyobb a repülőgép sebessége, annál magasabb, ritkább levegőben gazdaságos a repülés, ahol ugyanolyan sebesség eléréséhez kevesebb üzemanyagot kell felhasználni. A sok vitát kiváltott szuperszonikus utasszállító repülőgépek ezért nagy magasságban közlekednek, kipufogógázai bekerülnek a sztratoszférába. A sztratoszferikus ózon mennyiségi változásaira később visszatérünk.

Az V. táblázatban egymás után következnek a kén-dioxid, a szén-monoxid és a szén-dioxid. Mindhárom gáz főleg a fosszilis anyagok elégetése során és a motorizált közlekedés „jóvoltából” kerül a légkörbe. (A természetes forrásokkal itt nem foglalkozunk.) A kén-dioxid egy része savas esők formájában kerül a felszínre, ezek hatását már a nitrogén-oxidokkal kapcsolatban tárgyaltuk. A szén-monoxid biológiailag erősen reagens, az élő szervezetbe kerülve akadályozza a szervezet oxigénfelvételét, nagyobb koncentrációja ezért fulladást okoz. A CO-nak elnyelési sávja van a hosszúhullámú sugárzási tartományban, mennyisége azonban a légkörben oly csekély (II. táblázat), hogy üvegházhatása elhanyagolható.

Az egyik legvitatottabb kérdés az üvegházgázok gyarapodásának hatása a globális éghajlatra. Az üvegházgázok között első helyen áll a CO₂, mivel ennek mennyisége a legnagyobb a légkörben és gyarapodását a múlt század vége óta teljes bizonyossággal kimutatták. 1880 körül a légköri CO₂ aránya 280 ppm volt, napjainkban elérte a 350–360 ppm-t. A növekedés tehát az utolsó száz év alatt mintegy 25%-ot tett ki. A metán 7,7 μ m-es elnyelési sávja igen közel van a földi ki-sugárzás 10 μ m körüli maximumához, ezért erősen üvegházhatású gáz, légköri mennyisége azonban mintegy 150-szer kisebb a szén-dioxidénál. A metán gyarapodása is kimutatható az utolsó néhány évtizedben. A metánhoz hasonlóan üvegházhatású gázok a freonok, ezekről korábban már szó volt. Ezen három légköri gáz mennyisége kétségtelenül jelentősen növekedett az emberi tevékenység hatására az utolsó évtizedekben. A kérdés azonban az, hogy az üvegházhatás mellett milyen más tényezők befolyásolják a Föld átlaghőmérsékletét? És ha vannak ellentétes hatású tényezők, ezek meddig és milyen mértékben kompenzálhatják az üvegházgázok melegítő hatását?

A legtöbbet emlegetett érv az üvegházhatás mellett az a tény, hogy a globális lég-hőmérséklet a múlt század utolsó évtizedeitől 1940-ig 0,5 °C-ot emelkedett, az északi hemiszféra ugyanezen idő alatt 0,8 °C-ot melegedett. Az általános fölmelegedés kezdete tehát egybeesik az iparosodás megindulásával. Kis „szépséghiba”, hogy a globális átlaghőmérséklet 1940 után, kb. az 1960-as évekig néhány tized fokkal csökkent, azaz egy átmeneti lehűlés mutatkozott. A 60-as évektől a 80-as évekig ismét melegedés kezdődött. Kétségtelen tény, hogy a CO₂ mennyiségének növekedése, mint fentebb említettük, 1880-tól folyamatosan tart, és 100 év alatt 25%-ot tett ki.

Mégsem fogadhatjuk el teljesen bizonyítottnak, hogy a globális fölmelegedés egyedüli oka az üvegházgázok gyarapodása a légkörben. Ellenérvek a következők:

Az 1880-nál korábban megkezdett rendszeres hőmérsékletmérések adatait figyelmen kívül hagyták. Igaz, hogy a múltba visszafelé haladva egyre kevesebb mérésadat

áll rendelkezésünkre, így globális vagy hemiszfrikus átlaghőmérsékletet számolni merészség volna a meglévő adatokból. Ezen a nehézségen azonban segíthetünk, ha pl. 9–10 éves középértékeket számolunk a rendelkezésünkre álló adatokból. Nyilvánvaló ugyanis, hogy minél hosszabban tartó lehűlést vagy fölmelegedést regisztrálnak egy klímaállomáson, annál valószínűbb, hogy ez a hőmérsékleti változás nagy területekre, kontinentális vagy annál is nagyobb térségekre jellemző. A hiányzó klímaállomásokot tehát a meglévő adatok 9–10 éves átlagolásával lehet többé-kevésbé pótolni.

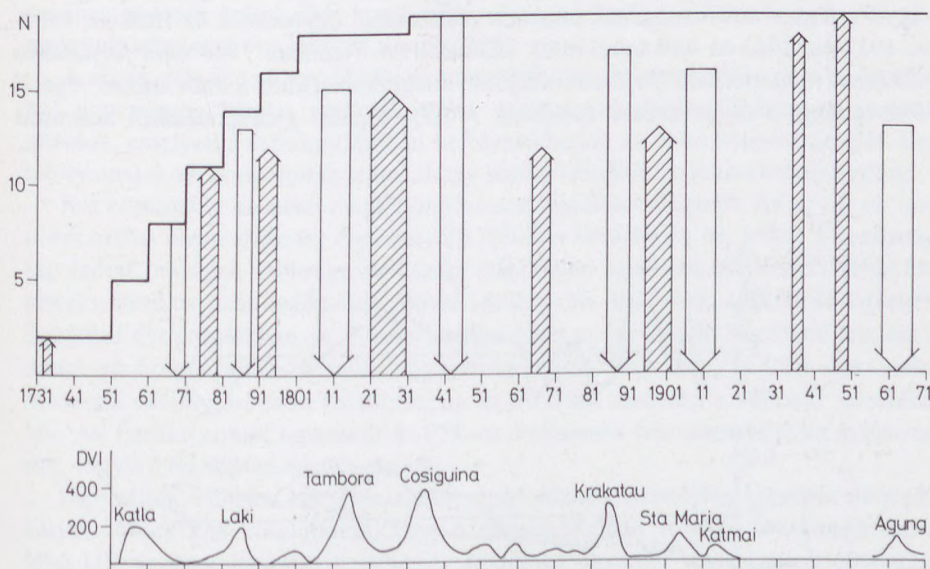
Ha ezt az elvet elfogadjuk, akkor az északi félgömb hőmérsékletének alakulását az 1880 előtti évtizedekre is megvizsgálhatjuk. A VI. táblázatban megadjuk azoknak a klímaállomásoknak a sorát, amelyekről 150 évnél hosszabb hőmérsékleti adatsor áll rendelkezésünkre. A felsorolt 19 állomás közül kettő a szubpoláris, három a szubtrópusi, tizennégy a mérsékelt övi zónában található. Ezen állomások hőmérsékleti adatsorát 9 évi átlagolással simítva megkapjuk a tartósabb lehűlések (minimum évek), illetve tartósabb fölmelegedések (maximum évek) időpontját.

VI. táblázat
Klímaállomások adatsorai és földrajzi pozíciói

Central England	52,8° é. sz.	2,5° ny. h.	1659–1987
De Bilt	52,6° é. sz.	5,1° k. h.	1706–1970
Charleston (USA)	32,9° é. sz.	80,0° ny. h.	1741–1759 1823–1965
Edinburgh	55,9° é. sz.	3,2° ny. h.	1764–1970
Basel	47,6° é. sz.	7,6° k. h.	1755–1970
Genf	46,2° é. sz.	6,2° k. h.	1753–1970
Trondheim	63,4° é. sz.	10,4° k. h.	1961–1969
Stockholm	59,4° é. sz.	18,0° k. h.	1757–1970
Koppenhága	55,6° é. sz.	12,5° k. h.	1768–1776 1782–1788 1798–1970
Greenwich	51,5° é. sz.	0,0°	1763–1970
Berlin	52,6° é. sz.	13,4° k. h.	1769–1970
Párizs	48,8° é. sz.	2,5° k. h.	1764–1970
Prága	50,1° é. sz.	14,4° k. h.	1771–1989
New Haven (USA)	41,3° é. sz.	72,9° ny. h.	1781–1970
Hohenpeissenberg	47,8° é. sz.	11,0° k. h.	1781–1970
Bécs	48,3° é. sz.	16,4° k. h.	1775–1970
Budapest	47,5° é. sz.	19,0° k. h.	1780–1970
Kremsmünster	48,1° é. sz.	14,1° k. h.	1796–1985
Genova	44,5° é. sz.	3,5° k. h.	1833–1986

A 11. ábrán feltüntettük azokat a rövid, néhány éves időszakokat, amikor a mérő-állomások többségén a 9 évi átlaghőmérséklet mélypontot illetve maximumot ért el. Feltűnő, hogy 1890 körül a legtöbb állomáson lehűlést regisztráltak. Nagyon valószínű tehát, hogy ekkor az északi hemiszféra átlaghőmérséklete is alacsony volt. Az 1930-as és 40-es években viszont csaknem valamennyi klímaállomáson fölmelegedés volt észlelhető. Ez az időpont megegyezik a globális és az északi félgömbi fölmelegedés időpontjával. A részletesebb elemzésből azonban az is kiderült, hogy a 19 állomás közül 9 állomáson az 1800-as évek elején vagy az 1700-as évek során az 1930–40-es évekénél is magasabb csúcshőmérsékleteket mértek. Ez azt jelenti, hogy az iparosodást megelőző időszakban, tehát az üvegházgázok gyarapodásától függetlenül is előfordult erősebb fölmelegedés.

A 11. ábra alsó részén bemutatjuk a légkörben lévő vulkáni hamu mennyiségét kifejező ún. „porfátyolindex” változásait (DVI = Dust Vail Index). Két dolog érdemel figyelmet az ábra alsó és felső részének összehasonlításakor. Az egyik: a hőmérsékleti mélypontok, tartós lehűlések többnyire egybeesnek a vulkáni hamumennyiségének növekedésével, a vulkáni tevékenység aktív szakaszaival, míg a tar-

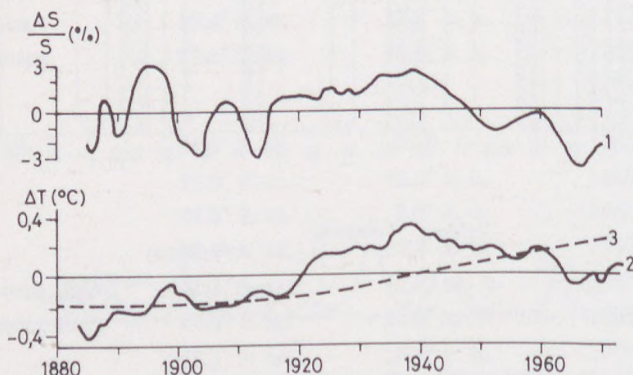


11. ábra. Felső rész: Hosszú hőmérsékleti adatsorral rendelkező klímaállomások száma (N) 1731-től 1971-ig. A felfelé mutató (vonalkázott) nyilak a tartós melegedést, a lefelé mutató (üres) nyilak a tartós lehűlést regisztráló állomások számát jelzik adott néhány éves időszakon belül. A nyilak hossza arányos az állomások számával. Alsó rész: A vulkáni hamu légköri mennyiségét kifejező index (DVI = Dust Vail Index), a nevezetesebb vulkánkitörések megnevezéseivel

tós melegedések a vulkáni szennyeződés csökkenésével, vagyis a vulkánosság csendesedésével. A másik: az 1903 illetve 1912 és 1963 közötti 50–60 év a *vulkáni tevékenység leghosszabb csendes időszaka* volt az utolsó mintegy 250 év során, és a sokat emlegetett globális fölmelegedés „véletlenül” éppen ezen időszak alatt következett be.

A légkör átlátszóságát (sugárzásáteresztő képességét) azonban nemcsak természetes tényezők befolyásolják, hanem az emberi tevékenység is. Az aeroszol mennyiségének növekedése csökkent a talajra érkező napsugárzás erősségét, ezért lehűlést eredményez. Mint azt a 3.3. fejezetben már említettük, a Szovjetunió illetve Oroszország nagy hagyományokkal rendelkezik a napsugárzásmérések terén. (Nem véletlen, hogy a GARP alprogramjai közül a sugárzási kísérletet tartalmazó CAENEX végrehajtását a Szovjetunió vállalta magára.) A WMO megbízásából készített tanulmányában PRIVOVAROVA (1970) kimutatta, hogy az aeroszol mennyiségének növekedése miatt az 1940-es évek közepétől a felszínre érkező direkt napsugárzás erőssége folyamatosan csökken. Ez a lassú csökkenés nem áll kapcsolatban a vulkáni aktivitással, sokkal inkább a fokozódó emberi tevékenység eredménye.

Igen tanulságos az az összehasonlítás, amit BUDYKO (1982) végzett a direkt napsugárzás, az északi hemiszféra átlaghőmérséklete és a szén-dioxid növekedéséből számított, elméletileg várható melegedés között (12. ábra). A direkt napsugárzás, vagyis a légkör átlátszóságának átmeneti csökkenései egybeesnek az 1880-as, 1903-as, 1912-es, 1963-as vulkánkitörések időszakaival. Azonban *1940 után folyamatos csökkenés tapasztalható*. Az északi félgömb átlaghőmérséklete a múlt század végétől 1940-ig nőtt, a 60-as évekre csökkent. A CO₂ légköri gyarapodásából számított



12. ábra. A direkt napsugárzás és az északi félgömb átlaghőmérséklete 1880–1970 között

Jelölések: 1. direkt sugárzás, 2. átlaghőmérséklet, 3. elméleti hőmérséklet-változás a CO₂ növekedés következtében (BUDYKO 1982 nyomán)

hőmérséklet folyamatosan emelkedik. A valóságban mért hőmérséklet ezt az emelkedést csak részben követi, 1940 után lehűlés kezdődött, ami a légkör átlátszóságának csökkenésével magyarázható. El kell tehát fogadnunk, hogy *a Föld éghajlatának alakításáért nem szabad egyetlen tényezőt felelőssé tenni.*

*

Az V. táblázatban felsorolt gázok közül a freonok és a nitrogén-oxidok hatással vannak a sztratoszferikus ózon mennyiségének változására. A freonok határozottan ózonbontók, a nitrogén-oxidok szerepe nem ennyire egyértelmű, mert egyrészt ózonbontók, másrészt éppen a freonból kiszabadult klóratomokkal is reakcióba lépve semlegesítik azokat.

Az 1980-as évek egyik szenzációja volt az a fölismerés, hogy a déli félgömb tavaszán, októberben, az Antarktisz fölötti sztratoszféra ózonkoncentrációja évről évre folyamatosan csökkenni kezdett. Ez a csökkenés két évtized alatt elérte az 50%-ot. A gyanú azonnal az emberi tevékenység során a légkörbe kerülő ózonbontó gázokra terelődött. Mindenesetre az ozonoszféra ritkulása komoly veszélyt jelent az élő szervezetekre, hiszen az ózonpajzs véd meg a gyilkos UV sugaraktól. A félelmet csak fokozta az a körülmény, hogy az Egyesült Államokban növekedett a bőrrákos megbetegedések száma. Bár korai stádiumban a bőrrák legtöbbször gyógyítható, a gyógyult betegeket óva intették a napozástól.

A sztratoszferikus ózon a kutatók érdeklődésének középpontjába került. Az ózonnal kapcsolatos kémiai reakciók egész sorát tanulmányozták keresve azokat a gázokat, amelyek a sztratoszférában befolyásolhatják az ózon koncentrációját. Ezek a folyamatok túl bonyolultak ahhoz, hogy könnyű áttekintést szerezhetnénk róluk.

Két körülmény azonban megkülönböztetett figyelmet érdemel. Az egyik az, hogy *a drasztikus ózoncsökkenés éppen a déli féltekén következett be*, holott a gazdaságilag fejlett országok többsége az északi félgömbön található. Az északi féltekén a sztratoszferikus ózon csökkenése jóval szerényebb, az Északi-sarkon is legfeljebb 8–10%. Egyes régiókban, pl. Közép-Európa felett pedig inkább növekedő tendenciát mutat az ózontartalom. A másik figyelemre méltó tény, hogy a Déli-sarkvidéken *tavasszal csökken az ózon* (októberben), az év többi részében a változás jelentéktelen. Az Északi-sarkon tapasztalt 8–10%-os csökkenés február-márciusra korlátozódik, vagyis a tél végére, tavasz elejére.

Úgy véljük, ennek a két jelenségnek magyarázatát viszonylag könnyen megtalálhatjuk. Abból kell kiindulnunk, hogy a sztratoszférában az ózon a napsugárzásban lévő UV sugarak hatására keletkezik. Mivel az egyenlítő és trópusok térségében egész éven át bőséges a napsugárzás, itt keletkezik a legtöbb ózon. A magasabb szélességek felé haladva a sugárzás egyre inkább a nyári félésre korlátozódik, a téli félévben egyre kevesebb a napsugárzás. A pólusok felé haladva a sugárzás évi összege is csökken. Ennek alapján kiszámították, hogy a legtöbb ózont a trópusok fölött

kellene találunk, 500–550 Dobson-egységet*; a sarkok felé egyre növekvő évszakos különbségekkel és csökkenő mennyiséggel kellene számolnunk, a póluson 150–200 Dobson-egységgel, továbbá nyári maximummal és téli minimummal.

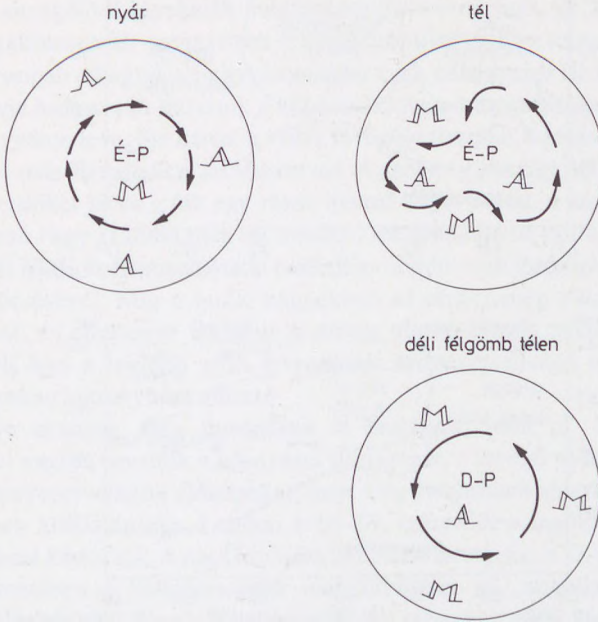
Ezzel szemben a valóságban az ózon eloszlása egészen más képet mutat. A trópusok fölött az ózon egész éven át mindössze 250–260 egység, az Északi-pólus közelében tavasz elején 440, ősszel 290 egység. A déli félgömbön az 55° szélesség közelében a déli hemiszféra tavaszán, október-novemberben 400 Dobson-egységgel tetőzik, míg ugyanitt május-júliusban 300 egységre csökken. A Déli-póluson az évi ingadozás és a mennyiség is kisebb.

A magasabb szélességeken és a pólusokon tehát várakozásunkkal ellentétben nem nyáron, hanem tél végén vagy tavasszal van az ózonmennyiség maximuma, míg a minimum tél helyett őszre tolódik. A magyarázatot a sztratoszféra áramlásrendszerében kell keresnünk. Nyáron a sztratoszféra legnagyobb részén *gyenge keleti szél* uralkodik, amelyben észak-déli irányú mozgás alig van. Télen viszont *erős nyugati áramlás* alakul ki a sztratoszférában, amelyben az északi félgömbön *hullámszerű háborgások* keletkeznek főleg a tél második felében és a tavasz elején (13. ábra). Ezek a háborgások levegőcserét bonyolítanak le a trópusi öv és az Északi-sarkvidék között, eközben az Egyenlítő felől ózon szállítódik a pólus felé. Az Egyenlítő és a 30° szélesség közötti terület (nagyjából az ózonképződés fő régiója) úgy aránylik a 60° szélesség és pólus közötti területhez, mint 3,6:1. Ez azt jelenti, hogy legalább 3,5-szer nagyobb térségből szállítható ózon a sarkvidékre. A tél végén kialakuló déli áramlás sebessége gyakran eléri a 20–30 m/s-t, ez napi 1700–2500 km utat jelent. A 10°-tól a 70° szélességig 4 illetve 2,6 nap alatt juthat el ezzel a sebességgel az egyenlítői levegő, magával szállítva a trópusi troposzférában termelődő ózont.

A *déli félgömb telén*, kb. a 60–70° déli szélességek között orkánerejű Ny-i áramlási gyűrű veszi körül az Antarktisz, ezért az Egyenlítő felől csak kevés ózon szállítható a 60° déli szélességen túl. A Déli-pólus fölött VII–IX. hónapok között, azaz télen és tavasz elején az ózon mennyisége eléri a 320 Dobsont. Őszre, a IV–V. hónapokra 280 Dobsonra csökken. A sztratoszféra cirkulációjának évszakos változásait és az ózonszállítás sémáját a 14. ábra szemlélteti. A 13. és 14. ábrákról érthetővé válik, hogy az Északi-sarkvidék fölött miért éppen a tél végén, tavasz elején található a legtöbb ózon, hiszen az Egyenlítő felől szállított ózon ekkorra akkumulálódik. Az őszi minimum idején a sarkvidék már egyre kevesebb napsugárzást kap, az ózontermelés megszűnőben van, a déli áramlások pedig még nem alakultak ki, tehát az ózonszállítás még nem indult meg. A déli félgömb telén az északi áramlások zömmel elakadnak a 60° déli szélesség táján, ezért tavasszal az 55–60° déli szélesség környezetében akkumulálódik az Egyenlítő felől szállított ózon, az Antarktiszra kevesebb jut. A Déli-sarkvidéken évi menetben mégis a tél végén, tavasz elején (VIII–IX. hónapok) van az ózon mennyiségének maximuma. Az ózontartalom október hónapokban

*A légköri teljes ózonmennyiséget Dobson-egységben mérik. 100 Dobson egy mm vastag ózonrétegnek felel meg, ha a tengerszíni levegő nyomására összepréselnénk a légkör teljes ózonkészletét.

Északi félgömb

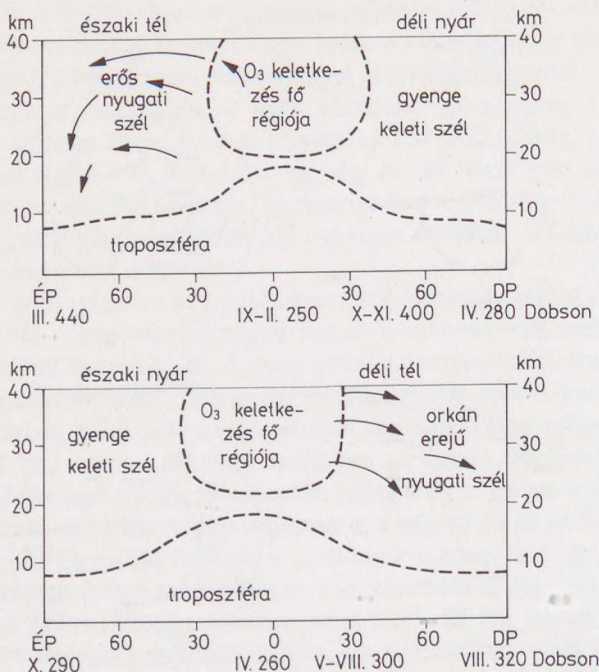


13. ábra. A sztratoszféra cirkulációjának sémája (20–30 km magasságban). Nyáron gyenge keleti áramlás uralkodik, télen erős nyugati szél, amelyben az északi félgömbön hullámszerű háborgások lépnek fel, ezeknek köszönhető az Egyenlítő és a pólus közötti levegőcsere és az ózonszállítás a pólus felé. A déli félgömb télen a Déli-pólust orkánerejű (70–80 m/s) nyugati áramlási gyűrű veszi körül, elzárva az Egyenlítő felőli ózonszállítástól

Jelölések: A – alacsony-, M – magasnyomás

tapasztalt csökkenésének okát abban kereshetjük, hogy az Antarktisz fölötti sztratoszférában a légáramlások által odaszállított ózonbontó anyagok a télen „körülzárt” délsarkai sztratoszféra ózontartalmát erősen pusztítják. A helyzetet kissé bonyolulttá teszi, hogy az ózon bomlásában közrejátszó kémiai reakciók egy része hőmérséklet-függő, $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ fölött gyengébb, $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatt erősebb az ózon bontása. Márpedig a déli pólus közelében a sztratoszféra hőmérséklete éppen $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ körül ingadozik.

Végül meg kell jegyeznünk, hogy rendszeres ózommérések az Antarktiszon alig néhány évtizede indultak meg. Nem tudhatjuk biztosan, hogy az 1980-as években tapasztalt ózoncsökkenéshez hasonló jelenség a mérések megkezdése előtt nem fordult-e elő máskor is. Ha kiderülne, hogy régebben is történt hasonló ózonritkulás, akkor ezt természetes okokkal is lehetne magyarázni, mivel a vulkánkitörések során számos olyan gáz kerülhet a sztratoszférába, amely az ózon bomlását előidézi. Gondoljunk arra, hogy az 1980-as években két nagyobb vulkánkitörés is történt: Mount



14. ábra. A sztratoszféra cirkulációjának évszakos változása a két félgömbön, valamint az ózon szállítása és mennyisége a különböző szélességeken és hónapokban

St. Helens (1980) az Egyesült Államokban és El Chicon (1982) Mexikóban. Túl korai lenne tehát eldönteni, hogy az ózon ritkulásáért mennyire felelős az ember és mennyire a természet. Mindenesetre nemzetközi megállapodások sora jött létre a természet és a légkör védelmére; erről a 6. fejezetben bővebben lesz még szó. Tény, hogy az Antarktisz fölött a tavaszi ózonszint az 1960-as években még 300–320 egység volt, az 1980-as évek közepére 150–160 Dobson-egységre csökkent.

Miközben a sztratoszféra ózonrétegét veszély fenyegeti, a troposzférában az emberi tevékenység folytán, legalábbis időszakosan, növekszik az ózonszennyezés. A légkörbe kibocsátott nitrogén-oxidok és szénhidrogének vagy szén-monoxid a napfény hatására átalakulnak, és a kémiai reakciók melléktermékeként megjelenik az ózon a talajközeli rétegekben. Az ózonnak ezért a troposzférában határozott napi és évi menete van: a nappali órákban, illetve a nyári hónapokban éri el maximumát, a hajnali órákban és télen van minimuma. Különösen a nagyvárosok erősen szennyezett levegőjében képződik a talajközeli rétegekben sok ózon, főleg a gépjárművek kipufogógázainak fotokémiai átalakulása folytán.

A nagyvárosi ember ismétlődő, száraz köhögéssel kezdi a napot. A tüdejében lera-kódott káros anyagoktól igyekszik megszabadulni a szervezet, de hiába, mert nap-közben a forgalmas utcák szennyezett levegőjéből újra és újra teleszívja légjáratait, tüdejét. Ha azonban elhagyja a nagyvárost, akár csak néhányszor tíz km-re, és ott tölt pár hetet, tüdeje hamarosan kitisztul, a köhécseles lassan megszűnik. A szervezet jel-zést ad: a nagyváros levegője káros, a vidék levegője tisztább, egészségesebb.

A természet más formában *is jelzéseket ad*. A szemet gyönyörködtető thüringiai és szászországi erdőket járva a fák egy része ijesztő képet mutat, a szennyezett levegő (ózon, savas eső vagy ki tudja még mi minden) megtámadta az erdőt, a fák megbete-gednek. A volt NDK és Csehszlovákia területén csöppet sem törődtek a levegő tiszta-ságának megőrzésével. Míg a budai hegyekben az ember még valamennyire tiszta levegőt szívhat, és elrettenve tekint le a várost ellepő barnás színű szennyrétegre, addig az NDK-ban a legtöbb erdő levegője is természetellenes idegen szagokat, olykor kifejezetten kátránybűzt áraszt.

Szerencsére akadnak még Európában is országok, mint pl. Svájc, Ausztria, Norvégia, ahol nagyra becsülik a környezet tisztaságát, a levegő védelmét. Szigorúan betartják a környezetvédelmi előírásokat, mert elég értelmesek ahhoz, hogy belássák: ez mindenkinek közös érdeke. London a 16–17. századtól a legutóbbi időkig híres volt a sűrű városi ködökről. A napfényhiányból eredő betegség, a D-vitamin-hiány és ennek következtében a lábszárcsontok meggörbülése, az „angolkór” innen kapta elnevezését. Napjainkban Londonban ismeretlen a szennyes, sűrű, városi köd. Évtize-dekkel ezelőtt sikeresen vették fel a harcot a füstöt okádó kéményekkel, s a jelek szerint a járművekkel is.

6. NEMZETKÖZI EGYEZMÉNYEK A LÉGKÖR VÉDELMERE ÉS AZ ÉGHAJLAT STABILIZÁLÁSÁRA

6.1. A MODERN EMBER ÉS AZ ŐSI KELETI BÖLCSESSÉG

Az értelmes ember, a „*Homo sapiens*” igyekszik meghódítani és minél tökéletesebben kihasználni, szolgálatába állítani a természetet. Városokat épít, ahol egyre több ember zsúfolódik össze szűk lakótelepeken. A háztartásában egyre több elektromos berendezést szerel föl: automata mosógépet, televíziót, hűtőszekrényt, porszívót, villanyvasalót, magnót, videomagnót, légkondicionálót. Autót vásárol, hogy hosszabb-rövidebb utazásait minél nagyobb kényelemben bonyolíthassa le. A trópusi erdők irtásával új termőföldeket akar megszerezni. A fogyasztói társadalom kielégíthetetlen étvágya egyre több és változatosabb ipari, vegyipari termék előállítására és tömeges gyártására serkenti.

Ahhoz, hogy a technikai civilizáció minél több „áldásához” hozzájuthasson, hogy életét „kényelmesebbé” tegye, lőt-fut, pénzt hajszol. Néhány perces kényelemért hetek, hónapok, sőt, néha évek kényelmetlenségeivel fizet. Egyre újabb célokat tűz ki magának, ezért szinte soha sem ér rá, mert fél, hogy lemarad a szerzési versengésben.

Talán érdemes volna tanulnia A. A. Milne *Micimackójától*, az ősi keleti bölcsesség, a taoizmus nyugati megtestesítőjétől. Ez a Csekélyértelmű Medvebocs nem borong, nem habozik, nem kalkulál, nem nagyképűsködik, csupán VAN. Tudomásul veszi, hogy minden dolognak Belső Tulajdonsága van, és kiváló érzékkel igazodni tud ehhez. Ezért anélkül, hogy erőszakkal, tudálékossággal irányítani akarná az eseményeket, egyszerűen engedi, hogy megtörténjenek azok. Mégis minden helyzetben megtalálja a megfelelő megoldást. Az ősi kínai írás, a „Tao tö king” (Utak és erények könyve) ezt úgy nevezi, hogy „vej-vu-vej”, cselekvés nélküli cselekvés.

Milne *Micimackója* örökké nyugodt, megfontolt. Logikája gyermekien egyszerű, de soha nem vezet zsákutcaá. Ellentétben az állandóan rohangáló modern emberrel, ő mindig ráér, gyönyörködik a napsütésben, a madarak énekében vagy a téli hóesésben. Nem akar erőszakkal beavatkozni a természet dolgaiba, ezért soha nem ront el semmit.

Kínában teaházak vannak, ahova az emberek betérnek, órákig üldögélhetnek, beszélgetnek. Nyugaton az utcai hot dog- vagy hamburgerárusok bódéi szinte kiabálják: kapj be néhány falatot, azután rohanj tovább! Az örökös tennivalók nem hagynak időt az élethez. Mégis éppen Kínában történt az a tanulságos esemény, amikor a társadalom együttes erővel meg akarta változtatni a természet rendjét. Mao Ce Tung parancsára a kínaiak milliói éjjel-nappal hajszolták a verebeket; mivel „haszontalan”

madarak, el kell pusztítani őket. A veréb fáradékony állat, nem bírja az órákig tartó repülést, ezért sikerült a kínaiaknak elpusztítani a verebek hatalmas tömegét. A következő időben azonban hihetetlen mértékben szaporodni kezdtek a kártékony hernyók, és tönkretették a fákat, a gyümölcsösöket, a kerteket. A természetben ökoszisztémák vannak, amelyeknek minden egyes tagja fontos szerepet tölt be. Ha egy ökoszisztéma valamelyik tagját erőszakkal eltávolítjuk, a normális egyensúly megbomlik.

A taoista bölcsesség szemben áll a „Felszeletelt Tudós” rövidlátásával. Micimacskó nem érti a hosszú, tudálékos szavakat, így lett félrehallásból a Felszentelt Tudósból „Felszeletelt Tudós”, aki részproblémákra koncentrálna figyelmét, eközben nem látja a fától az erdőt. Nem biztos, hogy maradéktalanul egyet tudunk érteni a taoista bölcsességgel, de ha a technikai civilizáció fejlesztése közben kollektíven elrontottunk valamit, akkor el kell ismernünk, hogy a bölcsességünk körül valami nincs rendben. A jólét, a magasabb életszínvonal hajszolása rövidlátóvá tett bennünket.

Egy Münsterben élő kollégám, W. Bach meggyőződéssel vallotta, hogy az NSZK 20%-kal több energiát termel, mint amennyire szüksége volna. És ezt a *többletet* nem exportálják, hanem egyszerűen *elpazarolják*. A kormányzatot olyan gazdaságpolitikára kellene rábeszélni, mondotta, amely mindenkit az energiával való takarékosagra kényszerítene. Természetesen a pazarlás nem csak Németországra jellemző, hanem szinte valamennyi fejlődő vagy fejlett országra. Legfeljebb a pazarlás méretei és megnyilvánulásai különböznek.

Az 1960-as években nemzetközi összefogással sikerült, legalábbis néhány veszélyeztetett országban, megnyerni az éhínség elleni háborút (2.4. fejezet). Azóta még nagyobb és bonyolultabb, az egész világot érintő problémákkal találtuk szemben magunkat. Sikerül-e úrrá lennünk a szinte áttekinthetetlenül komplikált nehézségeinken? Egy ősi kínai mondás szerint: „Az ezermérföldes utazás is egyetlen lépéssel kezdődik.” Tegyük meg tehát ezt az első lépést, és mérjük fel milyen és mennyi káros anyagot juttat az emberiség a légkörbe? Az előző fejezettel ellentétben itt a mennyiségre helyezzük a hangsúlyt.

6.2. SZÁMVETÉS A LÉGKÖRI GÁZOKKAL

Hogy összemérhessük mi is történik a légkör összetételével az emberi tevékenység következtében, először készítsünk leltárt a légkör fontosabb gázösszetevőiről.

A légkör össztömege:	$5,2 \cdot 10^{15}$	tonna (N_2 , O_2 , Ar, CO_2)
ebből nitrogén (N_2):	$4,0 \cdot 10^{15}$	tonna
oxigén (O_2):	$1,0 \cdot 10^{15}$	tonna
argon (Ar):	$4,8 \cdot 10^{13}$	tonna
szén-dioxid (CO_2):	$1,8 \cdot 10^{12}$	tonna
metán (CH_4):	$1,04 \cdot 10^{10}$	tonna
nitrogén-oxidok (N_2O , NO_x):	$1,31 \cdot 10^9$	tonna

Az 1985-ös fölmérések szerint az üvegházgázoknak a légkörbe való kibocsátása világméreteken a következőképpen alakult:

CO ₂ a fosszilis anyagok égetéséből	$6,0 \cdot 10^9$ tonna/év
CO ₂ az őserdők irtása miatt	$1,9 \cdot 10^9$ tonna/év
NO ₂ -ből nitrogén	$12,5 \cdot 10^6$ tonna/év
CH ₄	$5,4 \cdot 10^8$ tonna/év
CFC freon 11 + freon 12	$7,1 \cdot 10^5$ tonna/év
H-CFC freon 22	$9,7 \cdot 10^4$ tonna/év

Ha csökkenteni akarjuk a légkört szennyező gázok kibocsátását, különbséget kell tennünk az eltérő fejlettségű országok között, és meg kell vizsgálnunk, mely államokat terheli a nagyobb felelősség, illetve milyen stratégiával lehet a légkört megmenteni. Eszerint külön csoportba sorolhatjuk: 1. az erősen fejlett, 2. a közepesen fejlett, 3. a gazdaságilag gyenge, 4. a fejlődő országokat.

A szennyező gázok közül a CO₂ kibocsátása (emissziója) a legnagyobb. Egy 1986-os fölmérés szerint a CO₂ globális emissziójának 46%-a az erősen fejlett, 27%-a a gazdaságilag gyenge, 19%-a a fejlődő, 5%-a a közepesen fejlett és 3%-a egyéb országokból származik (VII. táblázat).

Az éghajlat fölmelegedéséhez hozzájáruló, üvegházhatású gázok a troposzférában lévő arányukat és relatív melegítő hatásukat tekintve az 1980–90 között történt növekedésük figyelembevételével a következőképpen oszlottak meg:

szén-dioxid (CO ₂):	46%
metán (CH ₄):	9%
ózon (O ₃):	14%
freonok (CFC):	24%
nitrogén-oxidok (NO _x):	3%
vízgőz (H ₂ O):	4%
összesen	100%

Ezek a gázok a vízgőz kivételével, jórészt az emberi tevékenység következtében egyre nagyobb mennyiségben kerülnek a légkörbe. A világ különböző országaiban, kiváló kutatóintézetekben végeznek elméleti számításokat a légköri üvegházgázok várható hatásáról. Általában a jelenlegi növekedési tendenciákat extrapolálják a 21. századra, és ennek alapján számítják ki a globális átlaghőmérséklet várható emelkedését. Ezek az úgynevezett „másodfajú prognózisok”, amelyek a „ha..., akkor...” kérdésre keresik a választ, vagyis ez esetben: ha az üvegházhatás megduplázódik, akkor ez milyen fölmelegedést okoz a légkörben. Az elméleti modellek a CO₂ duplázódására 1,5-től 4,5 °C-ig terjedő fölmelegedést jeleztek, ami elég nagy bizonytalanságot fejez ki.

VII. táblázat

A CO₂ emissziója 1986-ban a gazdaságilag különböző fejlettségű országokban
(kategóriánként az első néhány ország) (BACH és JAIN 1991)

Ország	Emisszió 10 ⁶ t	Ország	Emisszió 10 ⁶ t
Erősen fejlett		Fejlődő	
1. USA	4766	1. Kína	2028
2. Németország	1067	2. India	539
3. Japán	914	3. Mexikó	266
4. Anglia	676	4. Brazília	175
5. Kanada	436	5. Venezuela	106
6. Franciaország	384	6. Argentína	99
7. Olaszország	365	7. Indonézia	98
		8. Thaiföld	49
Összesen	9235 (46%)	Összesen	3871 (19%)
Gazdaságilag gyenge		Közepesen fejlett	
1. SZU	3737	1. Dél-Afrika	293
2. Lengyelország	478	2. Ausztrália	245
3. Csehszlovákia	244	3. Spanyolország	189
4. Románia	212	4. Görögország	58
5. Észak-Korea	156	5. Írország	30
6. Jugoszlávia	128	6. Portugália	27
7. Bulgária	122	7. Izrael	26
8. Törökország	118		
9. Magyarország	83		
Összesen	5298 (27%)	Összesen	892 (5%)
		Egyéb összesen	459 (3%)

Mindenesetre az elméleti modellekkel veszélytelenül lehet kísérletezni a számítógépek segítségével. A légkörrel azonban korántsem veszélytelen a kísérletezés. Ezért szükséges időben fölmérni a lehetséges káros hatásokat, és intézkedéseket hozni ezek megelőzésére.

6.3. NEMZETKÖZI EGYEZMÉNYEK A LEVEGŐTISZTASÁG ÉS A LÉGKÖR VÉDELME

A levegőtisztaság védelmében, az Európai Biztonsági és Együttműködési Értekezlet záróokmányának szellemében összehívott 1979. évi genfi Összeurópai Magasszintű Környezetvédelmi Tanácskozáson alakították ki a nemzeti kormányok képviselői a nemzetközi együttműködés alapjait. A *Genfi Konvenciót 1979-ben* az európai országokon kívül az Amerikai Egyesült Államok és Kanada is aláírták. Ennek célja a nagy távolságokra jutó, országhatárokon áterjedő légszennyeződés korlátozása. Ebben az egyezményben a légszennyező anyagok kibocsátásának csökkentésére vonatkozó nemzetközi előírások bevezetésében és alkalmazásában a kibocsátásokról adandó rendszeres adatszolgáltatásban, a kibocsátás és terjedés közös kutatásában és a szennyező anyagok nagy távolságra jutásának megfigyelésére és értékelésére kidolgozott Európai monitoring és értékelési program (EMEP) továbbfejlesztésében állapodtak meg. Az egyezmény a légszennyező anyagok közül a kén-dioxidot (kén-tartalmú vegyületeket) megnevezi, a többi csak általánosságban említi.

Itt jegyezzük meg, hogy Magyarországon sok helyen végeznek folyamatosan légszennyezés méréseket, így az OMSZ (Országos Meteorológiai Szolgálat) keretében Farkasán (Szentgotthárd mellett), Pestlőrincen, Kecskeméten (K-pusztán) és Szarvason. A mérés lényege, hogy időegység alatt meghatározott térfogatú levegőt szűrőpapíron átszívznak, a szennyező anyagokat eközben a szűrőpapír felfogja. Ezután a felfogott szennyező anyagok mennyiségét és összetételét laboratóriumban vizsgálják.

A Genfi Konvenció megvalósításának első lépéseként a *kén-dioxid-kibocsátásának* és országhatárokon áterjedő mennyiségének csökkentését előíró jegyzőkönyvet *1985-ben Helsinkiben* a konvencióban résztvevő 35 ország közül 21 ország – köztük Magyarország – írta alá. Az aláíró országok vállalták, hogy az 1980. évi SO_2 -kibocsátásukat legkésőbb 1993-ig legalább 30%-kal csökkentik. Továbbá, hogy a kibocsátás mértékéről és csökkentésére irányuló intézkedésekről a Konvenció Végrehajtó Testületét rendszeresen tájékoztatják. A jegyzőkönyv 1988-ban lépett hatályba, amikor a nemzeti törvényhozás keretében a jegyzőkönyvet ratifikáló országok száma elérte a tizennyolcat.

A jegyzőkönyvet az Amerikai Egyesült Államok és Nagy-Britannia nem írta alá, arra hivatkozva, hogy nemzeti intézkedések keretében már 1980 előtt nagymértékben csökkentették SO_2 -kibocsátásukat és az 1980. évi szinthez viszonyított további 30%-os csökkentés aránytalanul nagy terheket róna rájuk. Ezzel szemben a jegyzőkönyvet aláíró országok közül a savas esők hatásától leginkább érintettek: NSZK, Svájc, Ausztria, Svédország, olyan módosításra törekcsenek, ami a csökkentés kötelező mértékét legalább 50%-ra emelné.

A jegyzőkönyv értelmében hazánk SO_2 -kibocsátását az 1980. évi $1,633 \cdot 10^6$ tonnáról 1993-ig $1,143 \cdot 10^6$ tonna/évre kell csökkenteni.

Mivel a SO_2 -kibocsátás csaknem teljes egészében a tüzelésből, a fosszilis anyagok elégetéséből származik (V. táblázat), a kibocsátás a tüzelőanyagok felhasznált

mennyiségéből és kéntartalmából meglehetősen pontossággal számítható. Így a csökkentési kötelezettségek teljesítése ellenőrizhető.

A Genfi Konvenció megvalósításának második lépéseként a *nitrogén-oxidok* kibocsátásának korlátozását előíró jegyzőkönyvet *1988-ban Szófiában* 25 ország írta alá. Magyarország 1989 májusában csatlakozott az aláírókhoz.

A Szófia-i Jegyzőkönyv a következő alapvető kötelezettségeket rögzíti:

– 1994. december 31-ére biztosítani kell az 1987. évi NO_x -kibocsátási szintre történő beállást, „befagyasztást”.

– A csatlakozó országok vizsgálják meg a NO_x -kibocsátás csökkentésének további lehetőségeit, és dolgozzanak ki megfelelő intézkedéseket és ütemezést 1996. január 1-jéig.

– Lépéseket tesznek a vonatkozó technológiák átadásának, cseréjének elősegítésére.

– Biztosítják az ólommentes benzinellátást legalább a nemzetközi tranzitútvonalak mentén a katalizátoros gépkocsik szabad forgalma érdekében.

Megjegyzendő, hogy a „befagyasztást” csak kompromisszumként elfogadó 12 nyugat-európai ország külön nyilatkozatban a NO_x kibocsátásának 30%-os csökkentését vállalta 1998-ra. Más országok, így Portugália, Jugoszlávia és Törökország a jegyzőkönyvet nem írták alá, Írország csak az ülést követően vállalta az aláírást. Románia távolmaradt.

A jegyzőkönyv értelmében hazánk NO_x -kibocsátását az 1987. évre bejelentett $2,8 \cdot 10^5$ tonna/év szinten kell tartani 1994 után. Hangsúlyozni kell, hogy a NO_x -emisszió számítása az igen sok mozgó, pontszerű forrás, valamint a módszerek különbözősége és a nitrogén bonyolult kémiai reakciói miatt csak nagy bizonytalansággal, mintegy 25% hibahatárral lehetséges.

Az NO_x -jegyzőkönyv második lépésként az egyes régiókra javasolt kibocsátáscsökkentési arányok differenciált megállapítását irányozza elő. A differenciálás a talaj és a növényzet tulajdonságaitól függő, eltérő kritikus terhelések (ülepedések) alapján végezhető el. A hazai NO_x -kibocsátás az európainak 2%-át, a közép-európainak 5%-át sem éri el.

A levegőtisztaság-védelem témakörébe tartoznak a légkör védelmét célzó globális, az ENSZ Környezetvédelmi Program (UNEP) által kidolgozott ill. tervezett egyezmények is. A sztratoszferikus ózonréteg védelmére kötött 1985. évi *Bécsi Alap-egyezmény*hez hazánk 1988 elején csatlakozott. Az ennek végrehajtását célzó, az ózonréteget lebontó *freonok és halonok** felhasználását korlátozó 1987. évi *Montreáli Jegyzőkönyvhöz* a Minisztertanács 1989. február 20-i döntése alapján hazánk is csatlakozott.

A jegyzőkönyv értelmében az 1986. évi $5,5 \cdot 10^3$ tonna/év freonfelhasználásunkat 1993. július 1-jétől 20%-kal, 1998. július 1-jétől további 30%-kal, tehát összesen 50%-kal kell csökkenteni.

*A freonok és halonok a metánból mesterségesen előállított gázok, amelyek szén- és halogénatomokat, főleg klórt illetve fluort, olykor brómot is tartalmaznak.

A Montreáli Jegyzőkönyvet 1990-ben Londonban módosították, a freonkibocsátás csökkentésének menetrendje lényegesen fölgyorsult. További fontos döntések voltak várhatók az 1992 nyarán Rio de Janeiróban rendezett Környezet és Fejlődés Világkonferencián. Sajnos az érintett országok érdekei számos kérdésben ütköztek a Föld egészének védelmében hozandó intézkedésekkel, ezért a konferencia a várakozásokhoz képest kevés pozitív előrelépést eredményezett.

Az utóbbi időben több ország sürgeti az éghajlatváltozást okozó üvegházgázok kibocsátásának korlátozását nemzetközi egyezmény segítségével. Holland-francia-norvég kezdeményezésre 1989 márciusában állam és kormányfői találkozón fogadták el a légkör fokozott védelmére irányuló *Hágai Nyilatkozatot*, amelyet hazánk miniszterelnöke is aláírt.

A Noordwijken (Hollandia) 1989 novemberében tartott „A légszennyeződés és a klímaváltozások” című miniszteri szintű nemzetközi konferencia nyilatkozata, az 1988. évi *Torontói Konferencia* állásfoglalásának megfelelően, az egyes országoknak javasolta a szén-dioxid-kibocsátás 20%-kal történő csökkentését 2005-ig. A nyilatkozathoz hazánk is csatlakozott.

Legújabbban Németországban is behatóan foglalkoznak a CO₂-emisszió csökkentésének az energiatakarékosság útján történő megvalósításával. A villanyárammal, benzinnel való takarékoság nem kíván költséges átalakítást, mégis két legyet üthetünk vele egy csapásra: kevesebbet költünk energiára és kevesebb lesz a CO₂-kibocsátás a légkörbe. A közlekedés ésszerűbb megoldására kidolgozott számos terv közül az egyik legegyszerűbb az autóról a kerékpárra való áttérés. Nem közömbös az sem, hogy a kerékpárutak építése jóval olcsóbb, mint az autópályáké. Lehet, hogy Délkelet-Ázsia bölcsességben megelőzte Európát?

7. ÖNSZABÁLYOZÓ MECHANIZMUSOK A FÖLDÖN. GAIA

7.1. A FÖLD A VILÁGÚRBÓL NÉZVE

Az űrkutatás kezdeti egy-másfél évtizedében hasznosságáról vagy fölösleges voltáról erősen megoszlottak a vélemények. A csillagászzal, földtudományokkal foglalkozó szakemberek tele voltak várakozással. Csak sejteni lehetett azt a mérhetetlenül sok lehetőséget, amit a világűrben pályára állított műholdak, űrlaboratóriumok, űrhajók nyújtanak majd ismereteink bővítésére. A lehetőségeket nemcsak tudósok, de államférfiak is fölismerték. Az Egyesült Államok fiatal és minden, a világ egészét érintő kérdésre érzékeny elnöke J. F. Kennedy 1961. augusztus 25-én ezeket a prófétikus szavakat mondta: *„...should commit itself to achieving the goal, before this decade is out, of landing a man on the moon and returning him safely to the earth.”* (Azért idézem angol eredetiben szavait, mert Theodore C. Sorensen, Kennedy egyik legközelebbi munkatársa szerint az elnök egy-egy beszédére készülve, szinte minden mondatát újra és újra fogalmazta, mire az ötödik vagy tizedik verziónál megállapodott.) A mondat magyarul körülbelül így hangzik: *„... célul kell kitűznünk annak elérését, hogy – mielőtt az évtized befejeződik – ember száll le a Holdra és biztonságosan visszatér a Földre.”*

Kennedy elnök már nem érte meg, de szavai beteljesedtek: 1969. július 20-án az Apolló-11 egyik utasa, Neil Armstrong elsőként lépett a Hold felszínére. A Holdra lépéskor mondott szavai azóta is a fülünkbe csengenek: *„Ez kis lépés egy embernek, de hatalmas ugrás az emberiségnek.”* Azóta ezt az első hatalmas ugrást sok, még ennél is nagyobb ugrás követte.

Ma már kissé anakronisztikusan hangzanak a kezdeti években hallatszó ellenvetések. Ezek egyike volt az a kérdés, hogy szabad-e ilyen rengeteg pénzt elpazarolni az űrkutatásra? A kérdésre Bartha György akadémikus, aki azóta elhunyt, ezt válaszolta: az Egyesült Államokban az emberek élvezeti cikkekre, alkoholra, dohányra több pénzt költenek el évente, mint amennyibe az űrkutatás kerül. Ehhez hozzátehetjük: hát még ha összehasonlítanánk az akkori fegyverkezési költségekkel.

Igaz, hogy a hidegháború éveiben a két szuperhatalom katonai és politikai versengésre is fölhasználta az űrkutatást. Szerencsére a józan belátás egyre inkább felülkerekedik, a műholdakról ugyanis a Földet is tisztábban látjuk, mint innen lentről. Különleges műholdak segítenek az ásványi lelőhelyek felkutatásában, a növényi betegségek korai fölismerésében, várható terméseredmények előrejelzésében, vizeink szennyezettségi állapotának detektálásában, távolsági beszélgetések, interkontinentá-

lis telefonálások lebonyolításában, minden eddiginél pontosabb és olcsóbb (!) térképek készítésében. A katonai kémholdak, a rakétás védelmi rendszerek pedig hozzájárultak egy nukleáris háború veszélyének elhárításához. Míg ez utóbbi passzív, a világűr sokirányú békés felhasználása aktív hasznot jelent a világ népeinek. Ezért remélhetjük, hogy a katonai célú rakéták és műholdak egyre inkább háttérbe szorulnak, különösen akkor, ha valós vagy vélt problémáinkat építéssel és nem háborús pusztítással akarjuk megoldani. De térjünk vissza a holdralépést megelőző első nagy lépésre, amely még az egyébként oly kimért, flegmatikus amerikai szakembereket is tűzbe hozta.

1966 végén sikerült a Csendes-óceán közepe táján, az Egyenlítő fölötti fix pontban geostacionárius pályára állítani az ATS-I (Application Technology Satellite) műholdat. Ez olyan technikai bravúr volt, amelyhez hasonlót a Szovjetunióknak a GARP program egész ideje alatt sem sikerült megvalósítania. Az eredeti tervek szerint ui. nekik kellett volna az öt geostacionárius műhold közül egyet az Indiai-óceán fölött pályára állítaniuk (lásd a 4. ábrán a GOMS műholdat). Emiatt, a FGGE sikere érdekében, a tervezett kettő helyett az amerikaiak három műholdat állítottak pályára.

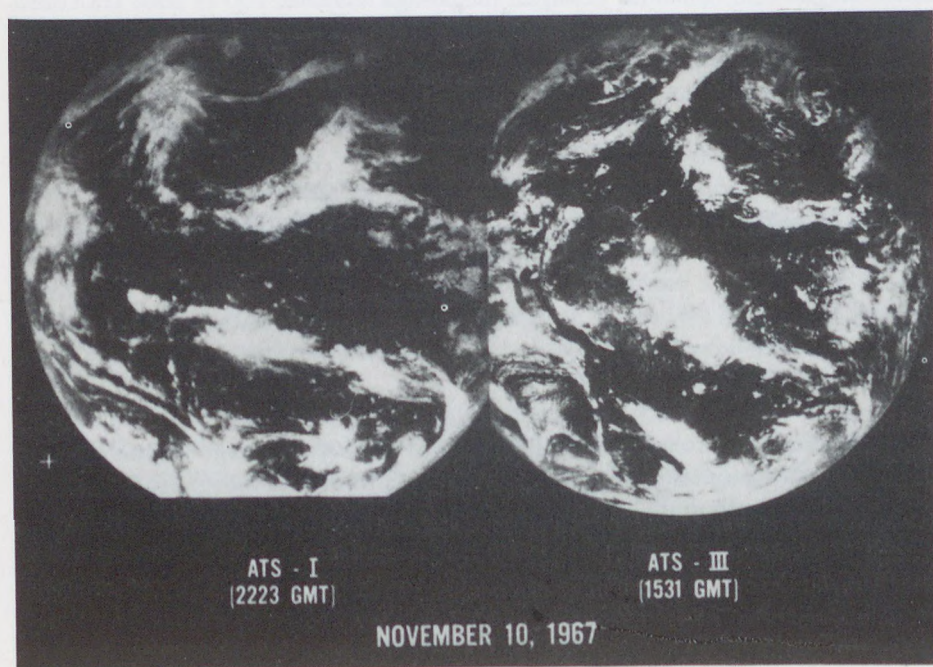


15. ábra. Az amerikai ATS-I geostacionárius műhold által készített felvétel a Földről (1966. dec. 11.)

Az ATS-I a Földnek mindig ugyanazt a részét látja. A legelső fölvételt 1966. december 11-én küldte a földi vevőállomásra (15. ábra). Így néz ki a Föld 36 000 km magasságból! Sok érdekesség nem látható ezen a képen, hiszen a műhold jóformán csak az egyhangú Csendes-óceánt látja, csupán a kép jobb szélén ismerheti föl az éles szemű néző a Kaliforniai-félszigetet és Észak-Amerika nyugati partszegélyét. Emellett az ATS-I fölvételei a látható fénytartományban, tehát közönséges fotózással készültek, ezért a Föld tengely körüli forgásának megfelelően, a kép keleti oldala a „helyi dél” elmúltával fokozatosan árnyékba borult. A „helyi éjszaka” óráiban pedig a műholdról csak az elsötétedett földkorong volt „látható”, míg a reggeli órákban a keleti szegélyen megjelent ismét a világosság.

Az ATS-I-t hamarosan követte az ATS-III, amelyet nagyjából az Amazonas torlatvidéke fölött állítottak fix pályára. Innen már jól látszott Dél- és Közép-Amerika, valamint Észak-Amerika nagy része. Nem késhetett sokáig a két műhold együttes földfotója, amely csaknem egyidejűleg mutatta meg a Föld ábrázatának két-szer nagyobb darabját (16. ábra). Az ATS-I-III ikerkép dátuma 1967. november 10.

Napjainkban ezeknek az első felvételeknek inkább csak tudománytörténeti értékük van, hiszen azóta érdekesebb és jobb minőségű földfotók készültek. Semmikép-



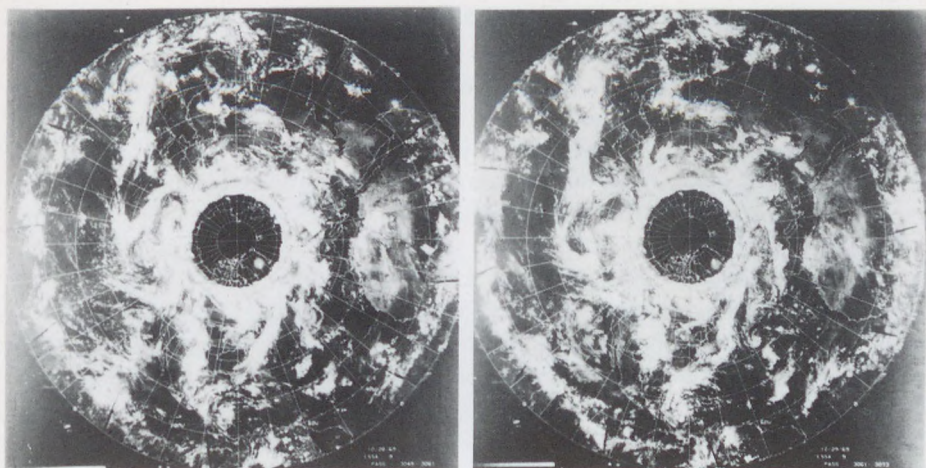
16. ábra. Az ATS-I és ATS-III műholdak együttes felvételei (1967. nov. 10.)

pen sem szabad azonban alábecsülni azt az eredményt, hogy a Földnek egy előre meghatározott pontja fölött sikerült a Földdel együttforgó pályára állítani műholdat. Ez a technikai bravúr alapozta meg a 70-es években a GARP úrbázisú rendszerének sikerét.

Mint a 4. ábránkon látható, az Egyenlítő egy pontja fölött pályára állított geostacionárius műholdak mindegyike a Földnek egy meghatározott részét tudja látókörébe fogni. Az 50. szélesség táján már erősen torzítva látszik a Föld, a 60. szélességen túl pedig egyáltalán nem is látható. Ezzel szemben a *poláris pályán keringő műholdak* detektoraikkal végigpásztázzák az egész alattuk elterülő földfelszínt, miközben mozaikkockákhoz hasonló négyszögletes képek sorát készítik. Egy-egy földközeli keringésük alatt ezek a mozaikok egy hosszú sávot képeznek a Déli-sarkvidéktől az Északiig és fordítva. Minthogy a legtöbb ilyen műholdpálya az Egyenlítőt nem derékszögben, hanem pl. 70–80 fokos szögben metszi, a műhold talppontjainak sorozata is csupán az északi és déli 70–80. szélességeig terjed. A pólus közvetlen környezetét tehát ezek a műholdak sem látják. Helyesebb ezért, ha *kvázipoláris pályán keringő műholdakról* beszélünk. A Szovjetunió, az USA és az Európai Űrkutatási Hivatal (ESA = European Space Agency), valamint más országok által felbocsátott, poláris pályán keringő műholdakat különböző magasságú pályákra állították. A meteorológiai célú műholdak keringési magassága általában 650 és 2600 km között változott. A keringés ideje és a pályamagasság közötti kapcsolatot az alábbi néhány adattal érzékeltetjük:

magasság (km)	keringési idő (perc)
650	97
900	103
1000	105
1500	116
1800	122,6
2000	127
2500	139

A poláris pályán keringő műholdak kb. 600 és 1800 km magasságban mintegy másfél-két óra alatt tesznek meg egy teljes kört a földközeli mozgásuk közben. Ez idő alatt a Föld „elfordul” kelet felé, óránként 15 hosszúsági fokkal, így az azonos földrajzi szélességhez visszaérkező műhold (kétórás keringési idő esetén 30 fokkal) nyugatabbra metszi az adott szélességi kört. Egy nap alatt így 12–16 földközeli keringést végezve, 1200–2400 km széles sávokban végigfotózza a földfelszínt. Ezeket a fotókat precízen egymáshoz illesztve előállítható a teljes Föld képe. Természetesen, ha a műholdpálya 80 fokos szöget zár be az Egyenlítő síkjával, akkor a műhold látómezeje nem terjedhet túl a 80. szélességi körökön.



17. ábra. Az amerikai ESSA 9 poláris pályán keringő műhold által készített felvételek montázsa (1969. okt. 28. és 29.)

Az amerikaiak által kifejlesztett ESSA (Environmental Survey Satellite) műhold-család 9-es számmal jelzett tagja 1969. október 28-án és 29-én készített mozaikfelvételeiből összeállított földfotókat a 17. ábrán mutatjuk be. A montázson jól látható az Északi-sark körüli „vak folt”, ami jelzi, hogy az ESSA 9 a 70° szélességen túl már nem látja a Földet. A földrajzi fókahálózatot és a kontinensek körvonalait számítógép rajzolja a fölvételekre. Érdeemes megfigyelni a $10.^\circ$ szélességi kör mentén húzódó felhőzónát, amely a trópusi zivatarfelhők összefüggő rendszerét mutatja. A $60\text{--}70^\circ$ szélességtől délnyugati irányban kiterjeszkedő széles felhősávok a mérsékelt övi ciklonok egy-egy frontjának felhőrendszerei. Az október 28-i és 29-i képet összehasonlítva megfigyelhetjük a frontok felhőzetének elmozdulását és kisebb-nagyobb átalakulását.

Az egymást követő napokon készített montázsképeket sorba rakva szinte önként kínálkozik az ötlet, hogy ezekből egy mozgófilm állóképeit lehetne előállítani, és megelevenedik előttünk a Föld légköre. Mozogni, fejlődni, átalakulni, szertefoszlani látjuk a felhőrendszereket. A 24 órás időfelbontás azonban túlságosan hosszú, a folyamatos mozgás helyett groteszk ugrálásokat látnánk magunk előtt. Ennél finomabb időfelbontást nyújtanak a geostacionárius műholdak mintegy félórás időközönként készülő felvételei.

Említettük, hogy ezek a műholdak helyzetüknek megfelelően a Földnek mindig ugyanazt a részét látják. Nem említettük azonban, hogy a meteorológiai műholdak, akár poláris, akár geostacionárius pályára állítják őket, többféle érzékelővel vannak felszerelve. A látható fénytartományon kívül általában infravörös érzékelőt is hasz-

nálnak. A Föld hosszúhullámú kisugárzása folyamatos, tehát az infravörös vagy hő-sugárzás tartományában éjjel-nappal lehet „fényképezni” a Földet. A légkör jelentősebb üvegházgázai közül a 10–13 μm hullámhosszak között egyiknek sincs elnyelési sávja, és minthogy a vízgőz az egyik legfontosabb üvegházgáz, ezt a sávot „vígőz ablaknak” nevezik. Az elnevezés jól kifejezi, hogy ebben a hullámhossztartományban a vízgőz „ablakot nyit” a földi kisugárzásnak. Ezen hullámsávban tehát megfelelő szűrővel fotózni lehet a földi kisugárzást.

Az infravörös sugárzás detektálásának több előnye is van. Az egyik, hogy éjjel-nappal mérhető, a másik az, hogy a kisugárzó felszín hőmérsékletére is következtetni lehet a sugárzás intenzitásából. A hideg felületek, felhők, hó- és jégtakarók világosak, a meleg felszínek sötétek az infravörös képeken. Mivel a szárazföldek éjszaka lehűlnek, a tengerek aránylag melegek maradnak, ezért az éjszakai infravörös fölvételeken a kontinensek világosak, a tengerek sötétek. A déli órákra megfordul a helyzet, a szárazföldek fölmelegednek, a tengerek viszonylag hűvösek maradnak, ezért a nappali infravörös fölvételeken a kontinensek a sötétek, a tengerek világosak.

Az infravörös (IR = infrared) képek tehát módot adnak a felszín hőmérsékletének mérésére. Ennek ismét két előnye van: egyrészt a felhőtető hőmérsékletéből annak magasságára lehet következtetni, másrészt a felhőmentes területeken a talaj- vagy tengerfelszín hőmérséklete nagy területen mérhetővé válik.

Az Európai Űrkutatási Hivatal által 1977. november 23-án pályára állított METEOSAT-1 nevű geostacionárius meteorológiai műhold az Egyenlítő és a 0. délkör metszéspontja fölött helyezkedett el. A METEOSAT utódai is erről a pontról végzik megfigyeléseiket. Ez a műholdcsalád három csatornán is készít fölvételeket a Földről.

1. A 0,4 – 1,1 μm hullámhosszon, látható fény tartomány.
2. A 10,5 – 12,5 μm hullámhosszon, IR – „vígőzablak”.
3. Az 5,7 – 7,1 μm hullámhosszon, a vízgőz elnyelési sávjában.

Az utóbbi a vízgőz elnyelési sávjában méri a földi kisugárzást, ezért egyúttal érzékeli a légkör vízgőztartalmát. Minél sötétebb egy terület, annál kevesebb ott a légköri vízgőz, és fordítva, minél világosabb valahol a kép, annál több vízgőz jelenlétét jelzi. A METEOSAT 25 percenként készített „nyers” földfotóit a földi vevőállomásra, a németországi Darmstadtba továbbítja. A „nyers” fotókat számítógépbe viszik, ahol megfelelő program segítségével a képeket „kozmetikázzák”, azaz a földrajzi koordináták metszéspontjait, valamint a kontinensek partvonalait rárajzolják a műhold által készített fölvételekre. Ezáltal megkönnyítik a tájékozódást a képeken. Az így készített fotókat visszasugározzák a műholdnak, amely ezeket rögzíti, majd ismét a Föld felé sugározza, és az érdekelt országok meteorológiai szolgálatait vevőberendezéseiken vehetik a METEOSAT fölvételeit, illetve annak a számukra fontos részeit. A teljes földkorongot ui. 3-szor 3, azaz kilenc négyzetre bontják. Mivel Közép-Európa a METEOSAT képek felső harmadának középső négyzetében van, ezért a magyar szolgálat ezt a négyzetet használja, amit azután kinagyíthat, hogy az itt lévő részletek jobban láthatók legyenek.

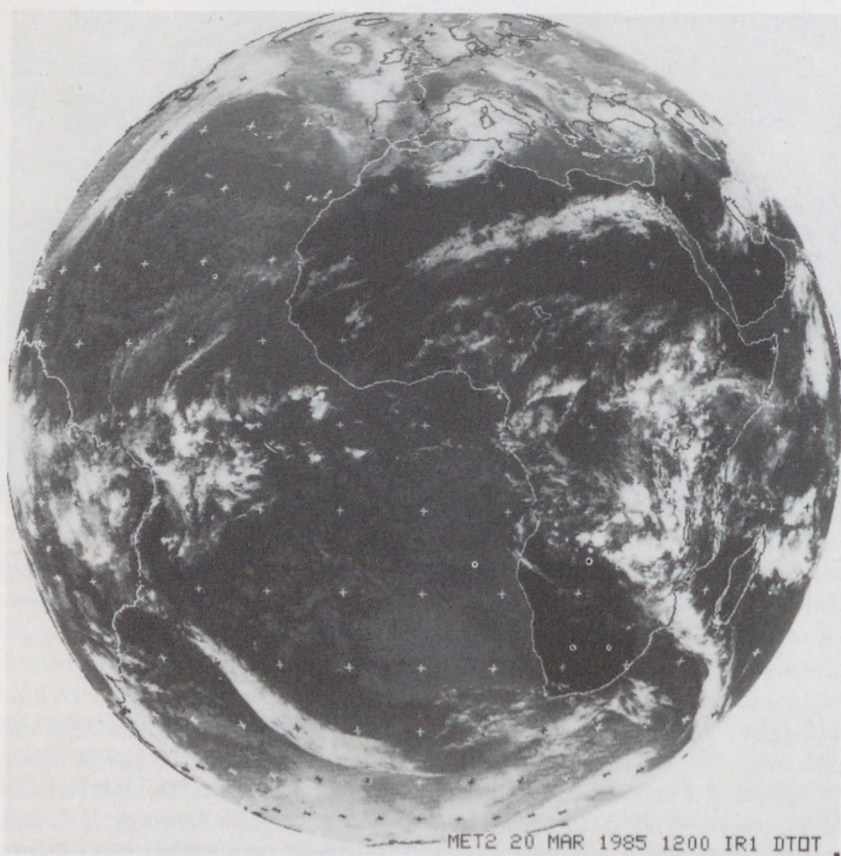


18. ábra. Az Európai Űrkutatási Hivatal (ESA) által felbocsátott METEOSAT-2 geostacionárius műhold 1985. március 20-án 12 órakor készített felvétele; vizuális kép a látható fény tartományban (Országos Meteorológiai Szolgálat)

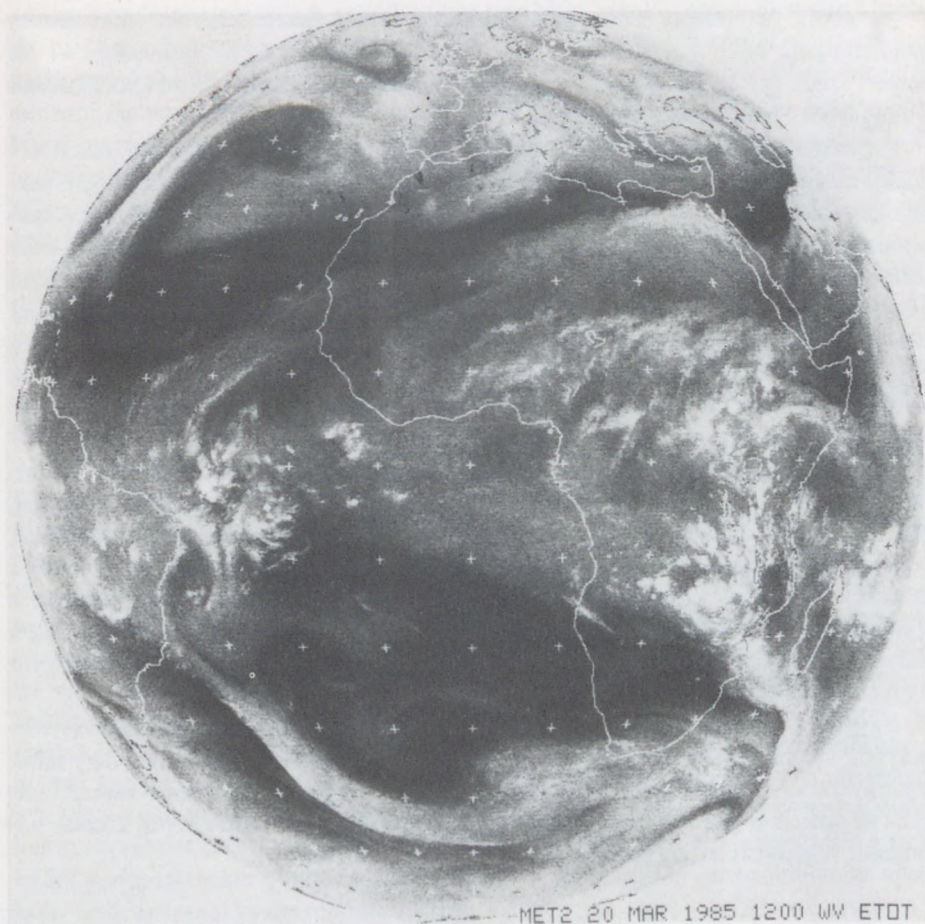
A 18., 19. és 20. ábrákon három egyidejű és teljes METEOSAT-2 felvételt mutatunk be. Ezek mindegyike 1985. március 20-án, helyi idő szerinti (greenwichi) 12 órakor készült. A 18. ábrán a vizuális, vagyis látható fényben készült felvételt láthatjuk. Ennek a képnek különlegessége, hogy a Nap március 20-án (vagy 21-én), helyi idő szerint délben éppen a műhold fölött tartózkodik az égen, ezért a kép középpontjában, a Guineai-öbölben, a műhold talppontjában jól látható a Nap tükörképe a tengeren (világos folt). Jól látható továbbá Afrika trópusi erdőinek sötétebb árnyalata és

a Szahara sokkal világosabb, a fényt erősebben visszaverő felszíne. A francia és olasz partoktól délre, a Földközi-tenger nyugati medencéjében a fehér felhőmező egy mediterrán ciklon jelenlétéről árulkodik. Európa nyugati partjai előtt, az Atlanti-óceánon örvénylő ciklonok spirál alakú felhőzónái szépen fölismerhetők. Érdekes felhőpamacsok látszanak az Atlanti-óceán déli részén, különösen Dél-Afrikától nyugatra.

A 19. ábra a Földnek infravörös (IR) képét mutatja. A legsötétebb részek, egész Afrika és az Arab-félsziget a legmelegebb felszínről árulkodnak. Természetesen a kisebb-nagyobb fehér foltok a hideg felhőzetet jelzik itt is éppenúgy, mint a kép többi részein. A hideg, tehát vastag felhőzet fehér foltjai is megtalálhatók az előzőleg említett ciklonok körzetében. Mind észak, mind dél felé haladva a magasabb szélességek alacsonyabb hőmérsékletét jelzi az egyre világosabb szürke árnyalat.



19. ábra. A METEOSAT-2-nek a 18. ábrán bemutatott felvétellel azonos időben készített felvétele az infravörös, hősugárzás tartományban (IR) (Országos Meteorológiai Szolgálat)



20. ábra. A METEOSAT-2-nek a 18. ábrán bemutatott felvétellel azonos időben készített felvétele a vízgőz elnyelési sávjában (WV) (Országos Meteorológiai Szolgálat)

A leginkább idegenszerű a vízgőz (WV = water vapour) felvétel (20. ábra). Mint ha kicserélték volna a szemünket, és nem a megszokott fényeket és árnyakat látnánk, hanem egy egészen más világot. Egy nagyvonalú festőművész hanyagul odavetett ecsetvonásait véljük felismerni. Hozzá kell szoknunk, hogy ezen a képen a világosabb sávok a több, a sötétebb területek a kevesebb légköri vízgőzt jelzik. Érdekes megfigyelni, hogy mindkét félgömbön a 20. és 30. szélességek között sötét sáv húzódik, a kör itt száraz, hiszen itt található a leszálló és szárító légmozgások által kialakított szubtrópusi sivatagok zónája.

Az eddig bemutatott műholdképek kivétel nélkül fekete-fehérek. Mint láttuk, meghatározott tudományos célokra a nem színes fölvételek is jól használhatók. Az emberi szem, így az űrhajósok szeme ezeket a képeket színesben látja. Csodálatosak a világűrből készült színes földfotók.

Ha valaki csupán repülőgéppel utazik, és letekint a Földre, folyókat lát, utakat, erdőket, megművelt földeken mértani pontosságú zöld, sárga vagy barna sávokat, szalagokat; hóval behintett hegycsúcsokat. A felhők mesés alakzatokat felsorakoztató birodalma tárul szemünk elé. Ha fölfelé tekintünk a repülőgép ablakából, 9–12 ezer méter magasságban az ég sötét liláskék színű, hiszen tőlünk nem messze, odafönn már a sztratoszféra kezdődik, a légkör tömegének 75–80%-a alattunk van. Néhány száz kilométerrel magasabban műholdak keringenek. De tekintsünk le mégegyszer a Földre például egy éjszakai repülés alkalmával. A nagyvárosok lámpái a fénypontok tömegét terítik szét a sötétségbe burkolózó Földön. Akár éjjel, akár nappal nézünk le nagy magasságból a Földre, látjuk, érzékeljük az élet nyomait ezen a bolygón.

Az Apollo-program keretében űrhajósok jártak, fényképeztek, filmeztek a Holdon. Csodálatos, de halott világ, ami eléjük tárult. Az életnek legcsekélyebb nyoma, még egy elevenen csörgedező patak sincs sehol. A Hold ege csaknem koromfekete, pora, sziklái szürkék, az árnyékok élesek. A színes fényképezés sem tud változatos színeket varázsolni a Holdra. A Mars felszínén az uralkodó szín a rozsdavörös, a Vénuszt sűrű és vastag felhőréteg árnyéka homályosítja. A Naptól távolodva pedig a bolygók és holdak felszínét egyre kevesebb napsugár éri, a hőmérséklet egyre mélyebben süllyed a fagypontra alá.

Egyedül vagyunk a Naprendszerben? Van-e az életnek valami nyoma a testvérbolygók valamelyikén? Régóta kísért a gondolat, hogy talán a Mars lehet vagy lehetett egykor az élet hordozója a Földön kívül. Igaz-e ez? Erre a kérdésre keresett választ az amerikai Viking-program, és mint már annyiszor, a Földön kívüli kutatás váratlanul visszavezetett a Földre.

7.2. A VIKING-PROGRAM

Nem akarok csalódást okozni az alfejezet címével. Itt nem lesz szó az amerikai Viking marsszondák technikai berendezéseiről, feladataik végrehajtásának módjairól és a kapott eredményekről. Ezekről bőven írtak a korabeli folyóiratokban, szaklapokban és a napilapokban is. Tény, hogy 1975-ben két Viking nevű űrszondát indított útjára a NASA (National Aeronautics and Space Administration = az amerikai Országos Repülésügyi és Űrkutatási Hivatal) azzal a céllal, hogy leszállóegységeik révén vizsgálják meg: van-e az életnek nyoma a Marson?

Ezt a missziót másfél évtizedes fölkészülés előzte meg. Mindenekelőtt azt kellett eldönteni, mik lehetnek az élet jelenlétére utaló nyomok egy bolygón. Előbb azonban azt is tisztázni kellene, hogy mit nevezünk élő és mit élettelen dolognak. Nobel-díjas tudósunk, Szent-Györgyi Albert nyíltan bevallja „Az élet jellege” című népszerűsítő

könyvében, hogy nem tudjuk egyértelműen meghúzni a határt élő és élettelen között. Az bizonyos, hogy nem a kémiai összetétel dönti el egymagában a kérdést; ezt egy szellemes gondolat kísérlettel igazolja is Szent-Györgyi. Hivatkozni lehetne a mindennapi tapasztalatból ismert élettani funkciókra: lélegzés, táplálkozás, szaporodás, külső ingerekre való reagálás, helyzetváltoztatás, növekedés. Tüzetes vizsgálat után azonban kiderül, hogy egyetemes életkritériumként ezek egyikét sem fogadhatjuk el. Márpedig ha a Marson vagy bármelyik bolygón az élet után kutatunk, előbb tudnunk kell, hogy mi is az élet, mi különbözteti meg az élettelenről.

A Viking-program előkészítésére biológusokat, vegyészeket és még több szaktudomány képviselőjét kérték fel. A feladatuk egyebek között az volt, találják ki, mi az élet jelenlétének ismérve valamely bolygón. A felkért szakértők között volt J. E. LOVELOCK angol biokémikus, aki a föltett kérdésem gondolkodva, néhány munkatársával, elsősorban L. MARGULISSzal (1973, 1991) eljutott a *Gaia-hipotézis* megalkotásáig.

Részen Lovelock gondolatait követve keressük most magunk is az élet egyetemes ismertetőjegyét. Előbb azonban meg kell ismerkednünk egy szokatlan, a termodinamikában és a matematikai statisztikában is használatos fogalommal, a riasztóan homályos *entrópiával*. Lehet, hogy a fizikusok rosszállóan csóválni fogják a fejüket, de a könnyebb érthetőség kedvéért *nevezzük az entrópiát a rendezetlenség mértékének*. Így rögtön egy szemléletes példával kezdhethetjük. Valahol építenek egy pompás középületet. Ne álljunk meg félúton: építik a parlamentet. Először is jól kidolgozott tervekre van szükség (szellemi előkészítő munka). Azután a helyszínre szállítják az építőanyagokat, kiássák az alapot, elkezdődhet a falak emelése (fizikai munka). Az építkezés környezete valóságos hadszínterré változik, mindenfelé törmelékek, a kiásott föld kupacokba hordva, építőanyagok szanaszét (a környezetben növekszik a rendezetlenség). Végül elkészül az épület, minden az előre megtervezett helyére kerül, a törmelékeket távoli helyre szállítják (ott nő meg a rendezetlenség). Ha a gyönyörű parlamentünkre gondolunk, a harmónia, a rendezettség jut eszünkbe, az elkészült épületben csökkent a rendezetlenség.

Mi is történt dióhéjban: munka (energia) árán egy meghatározott helyen (az épületben) csökkent a rendezetlenség (entrópia) úgy, hogy a tágabb környezetben rendezetlenséget csináltak. Mindez összhangban áll a természet egyik alaptörvényével, amely kimondja, hogy a természeti folyamatokban az entrópia nem csökkenhet (a termodinamika második főtétele). Az entrópia egy szűkebb környezetben csak munkavégzés, energiafelhasználás révén csökkenhet, miközben a tágabb környezetben az entrópia növekszik.

És itt kell keresnünk valahol az élet kritériumát. Az élő anyag szervezettsége, szigorú rendje csökkentett entrópiát jelent. Ahhoz, hogy az élő anyagban a környezeténél lényegesen kisebb legyen az entrópia, munkavégzésre, energiára van szükség. Az energiához táplálék felhasználásával jut az élőlény, a kémiai energia felszabadítása közben melléktermékek keletkeznek, ezeket az élőlény kibocsátja magából, ezáltal növeli a környezet entrópiáját. Lovelock ezek után arra a következtetésre jut,

hogyan azon a bolygón, amelyen élet van, kell lennie olyan *szállító közegnek*, amely egyrészt biztosítja a táplálékhoz való juttatását, másrészt a hulladékok és melléktermékek elszállítását, széthordását. Két ilyen közeg lehetséges: a folyadék (víz) és a légkör. A Marson cseppfolyós víz nincs, egyedüli szállító közeg marad: a légkör. Ha egy bolygó légkörének kémiai összetétele összhangban áll a rajta lejátszódó geokémiai folyamatokkal (az 5. fejezetben a földi légkörrel kapcsolatban erről már bővebben esett szó), akkor azon a bolygón nincsen élet. Lovelock szerint elegendő egy bolygó légkörének kémiai összetételét ismerni, hogy eldönthessük: van-e ott élet vagy nincs. A Földön ismert élőlényekre gondolva azonban ennél tovább is mehetünk. A legtöbb élőlénynek, fajtájától és fejlődési fázisától függően, három dologra van szüksége a fennmaradásához és fejlődéséhez. *Megfelelő hőmérsékletre*, amelyen a fiziológiai-kémiai folyamatok működni képesek. A legtöbb növénynek szüksége van a napfényben lévő *fotonokra*, amelyek a kémiai átalakulásokhoz szükséges energiát biztosítják számukra. Korábban említettük, hogy az emberi szervezetben is napfény segítségével keletkezik D-vitamin, ami nélkül a csontok nem tudnak egészségesen kifejlődni. Végül szükség van *nedvességre*, amely az élő szervezetekben a fiziológiai folyamatokban szereplő anyagokat (táplálékot, melléktermékeket) oda- vagy elszállítja.

Hogy e három dologból melyik élőlénynek és melyik életfázisában milyen mennyiségben van szüksége, az igen különböző. Az 1940-es években egy kiváló bácskai gazdálkodótól hallottam: ha télen nem lenne fagy, akkor az elvetett búza nem csírázna ki a földből, nem lenne termés. Abban az időben a jarovizációt Bácskában még senki sem ismerte. Az illető gazda tapasztalatból tudta, hogy a vetőmagnak a vetés előtti, illetve a csírázás előtti fázisban alacsony hőmérsékletre van szüksége. A szárra szökkenés fázisában már természetesen a búza hőigénye is megnő.

Amikor az élőlények fennmaradását biztosító három dolog felsorolásához kezdtem, kissé zavarban voltam. Igaz-e, hogy *minden* élőlénynek szüksége van napfényre? Óvatosságból azt írtam, hogy a legtöbb élőlénynek kell mind a három: megfelelő hőmérséklet, napfény és nedvesség. Ha az egyes élő fajokat különválasztjuk, akkor találunk olyanokat, amelyek a talaj vagy a tengerek mélyén napfénytől teljesen elzárva léteznek. Csakhogy az élőlények ökoszisztémákban élnek, amelyekben először is vannak *producensek*, azaz termelők. Ezek fotoszintézis révén az élettelen anyagot szervezetükben átalakítják fehérjévé, cukorrá vagy más szerves vegyületté. A producensek tehát napfényt, azaz fotonokat használnak fel, hogy előállítsák az élőlények alapanyagait. A következő láncszemet az ökoszisztémában a *primer fogyasztók*, általában növényevő állatok, alkotják. Ezek a producensek által használhatóvá tett alapanyagokkal táplálkoznak. A ragadozók a *szekunder fogyasztók*, ezeknek a primer fogyasztók szolgálnak táplálékkul. A ragadozók pusztulásával az anyag visszatér a talajba, vízbe, levegőbe; a *dekomponáló* szervezetek (mikroorganizmusok) vagy a *rekuperáló* szervezetek (dög- és korhadékevők) lebontják az élőlények anyagát, így használhatóvá teszik a producensek számára, és a körforgás folytatódik. Ha

tehát egy élő faj közvetlenül nem igényli is a napfényt, az ökoszisztémán keresztül közvetve mégiscsak szüksége van rá.

Az utóbbi néhány évtizedben néhány ateista országban, így hazánkban is, világnézeti okok miatt nem volt tanácsos teleológiáról beszélni. „Felszeleteltük” a természetet, hogy ki-ki a saját szeletkéjével foglalkozzék, és ne avatkozzék a mezsgyehatáron túl lévő dolgokba. Aki botanikus, maradjon a növényei között; aki zoológus, törődjön az állatok osztályozásával; aki fiziológus, az vizsgálja laboratóriumában az életjelenségeket. A teleológiát középkori ostobaságnak bélyegezték. Csakhogy a természet nem tiszteli a mesterkélt határokat, amelyek szétdarabolják a tudományokat. Az ornitológus megállapíthatja, hogy a veréb haszontalan tagja a madárvilágnak, ezért legjobb lenne kiirtani a verebeket. A kínai példa azonban figyelmeztet rá, hogy minden élőlénynek megvan a maga szerepe az élővilágban; ha kiirtjuk a verebeket, elszaporodnak a hernyók. Kár volna makacsul tagadni a célszerűséget a természetben. Napfény nélkül nincs producens, producens nélkül nincs primer fogyasztó, enélkül nincs szekunder fogyasztó, elhalás nélkül nincs körforgás az anyag vándorlásában. Ehhez még hozzátehetjük, hogy a víz körforgása nélkül nincs utánpótlása a szárazföldeken az édesvizeknek; a lefolyástalan tavak vize sósá válik, a sókoncentráció pedig olyan fokot ér el, ami elviselhetetlen az élőlények számára.

De térjünk vissza a rendezetlenség csökkentésére felhozott példánkhoz, egy méreteiben, díszítésében és harmóniájában is nagyszerű épület fölépítéséhez. A célszerű tervezés a legelső feladat, ezt szellemi munkának, tehát végső soron munkának neveztük. Ismét csak SZENT-GYÖRGYI ALBERTET (1973) idézem: ha valaki évmilliárdokon át dobálja egymásra a köveket vagy a téglákat, soha nem lesz a kő- és téglarakásból kölni dóm vagy budapesti parlament. Pedig fizikai értelemben óriási munkát végez, és energiafelhasználásával, mint láttuk, csökkenteni lehet a rendezetlenséget, legalábbis az entrópia-törvény ezt megengedi. Úgy tűnik tehát, hogy a nagyfokú rendezettséghez, az élőlényekre jellemző szervezett állapothoz több kell, mint energia. Csakhogy minek nevezzük ezt a többletet: célirányosságnak (teleológia), értelemnek, vagy valamilyen ismeretlen természeti törvénynek? Az építkezésnél ezt mérnöki tudásnak nevezzük. De hogyan nevezzük az élet kialakulásában és fennmaradásában? Talán mégsem lenne főbenjáró bűn, ha újra *teleológiának*, a természetben uralkodó célirányosságnak neveznénk.

A Viking-program azt a célt tűzte ki, hogy űrszondákkal földerítsék az élet nyomait egy idegen bolygón, a Marson. Az élet kutatásával azonban visszajutottunk a Földre, mint etalon bolygóra, amely mintául szolgál az életet hordozó bolygók keresésében. Az élet az anyag, a kémiai elemek és vegyületeik nagyfokú rendezettségét tételezi fel, amely úgy valósul meg, hogy az élőlények egymással és környezetükkel szoros kapcsolatot építenek ki. S bár az élőlényekben lejátszódó biológiai-kémiai folyamatok közül sokat ismerünk, magát az életet nem tudjuk definiálni. Úgy tűnik, az élet egy magasabb rendű elv, amely nem fér bele a fizikából és a kémiából jól ismert fogalomrendszerbe. Az élet ugyanakkor rendkívül érzékeny a külső hatásokra, köny-

nyen sebezhető, a környezetével kialakított harmónia erőszakos megbontásával *részlegesen* el is pusztítható. Szerencsére a pusztulás a tapasztalat szerint csak részleges, az élővilág ui. nagyfokú alkalmazkodóképességgel is rendelkezik, amely lehetővé teszi, hogy egy-egy élő faj pusztulását egy másik faj szaporodása ellensúlyozza, és miközben az élővilág összetétele átalakul, az élet maga megmarad. Ezzel tulajdonképpen el is érkezünk a következő témánkhoz, amit a Gaia-hipotézis címszó alatt a 7.3. alfejezetben fogunk áttekinteni.

7.3. A GAIA-HIPOTÉZIS

Az előzőek során láttuk, hogy a Viking-program előkészületei miként szembesítették a kutatókat az élet alapvető fölismerhetőségének kérdésével. Mint már említettük, ebben a munkában részt vett a neves angol tudós, J. E. LOVELOCK (1973) is, aki végül is eljutott a *Gaia-hipotézis* gondolatához, amely tulajdonképpen a régi görög mitológiához vezet vissza. Az ókori görögök a Föld istennőjét nevezték Gaiának jó kétezer évvel ezelőtt. Az a gondolat, hogy a Föld él, később is fölvetődött. *James Hutton* 1785-ben az Edinburgh-i Királyi Társaság előtt megtartott előadásában kifejtette azt a véleményét, hogy a Föld megfelelő tanulmányozása a fiziológia segítségével történhet, mivel az elemek körforgása a Földön párhuzamba állítható a *Harvey* által felfedezett vérkeringéssel.

Amikor LOVELOCK és néhány őt támogató munkatársa, elsősorban LYNN MARGULIS, amerikai tudós felújították a régi elképzelést, amely szerint a Föld egy gigantikus élőlény, a legtöbb folyóirat visszautasította kéziratuk közlését. Az általánosan elfogadott nézet ugyanis a légkört a bolygókigőzőlgések végtermékének tekinti. Az oxigénről például azt tartották a szakemberek, hogy kizárólag a vízgőz bomlásából ered, ugyanis a Nap ultraibolya sugárzásának hatására a vízgőzmolekula hidrogénre és oxigénre bomlik (disszociáció), a hidrogén könnyű gáz lévén jórészt elszökik a világűrbe, míg az oxigén 16-szor nehezebb, ezért a légkörben marad és évmilliók során felhalmozódik. Nehezen találtak ezért olyan folyóiratot, amely a Földnek élőlényként való bemutatását célzó kéziratot végül is leköszölte. A publikáció elfogadásában a szerzők segítségére volt *Carl Sagan*, a magyar televízióból is ismert „Kozmosz” ismeretterjesztő filmsorozat szerkesztője.

Idézzük fel LOVELOCK néhány érdekes gondolatát. Ha az ember például a tenger mélyén egy addig ismeretlen élőlényvel találkozik, legelső feladatának tekinti az élőlény besorolását az ismert törzsek, fajok, fajták valamelyikébe. Melyik fajhoz tartozik az illető élőlény? Ez az első és legfontosabb kérdése. Föl sem merül a kérdés: élőlény-e egyáltalán ez az ismeretlen valami? Megszoktuk ugyanis, hogy különösebb vizsgálódás nélkül meg tudjuk különböztetni az élőlényeket az élettelen dolgoktól. Gyermeckorunktól kezdve fokozatosan kialakult bennünk az az öntudatlan képesség, hogy különbséget tudunk tenni élő és élettelen között. Ugyanakkor megszoktuk azt is, hogy az élővilág tagjai méretük szerint behatároltak: a legnagyobb

vízi vagy szárazföldi élőlények, a bálnák, a hajdani sárkánygyíkok hossza nem nagyobb néhányszor tíz méternél, a világ legmagasabb fái legfeljebb száz métereseek, de semmiképpen nem érik el az ezer métert. A legparányibb élőlények már csak mikroszkóppal láthatók.

A mindennapi tapasztalatunk tehát képessé tesz egy élőlény fölismerésére, de ugyanakkor visszatart attól, hogy a megszokott méretűnél lényegesen nagyobb, gigantikus élőlényt elfogadjunk. Ha a Földanya, a Gaia élőlény, akkor ez méreténél fogva ellenkezik minden előző tapasztalatunkkal. Viszont semmi bizonyítékunk sincs arra vonatkozóan, hogy ami kívül esik a tapasztalataink világán, az nem is létezhet. Mindez csak arra ad magyarázatot, hogy miért vált ki ellenkezést a gondolat, amely szerint a Föld egy gigantikus élőlény.

Ami ennek az élőlénynek létét bizonyítja, az a földi légkör, valamint az óceán kémiai összetétele és az élet számára elviselhető éghajlat megmaradása.

A légköri gázok számbavételekor talán legkevésbé figyeltünk fel a metán jelenlétére, mivel mennyisége igen csekély. Mégis az oxigénnel való együttes jelenléte nem volna lehetséges az élővilág, a bioszféra aktív közreműködése nélkül. A metán, CH_4 ugyanis a napfény hatására az oxigénnel reakcióba lép, és a két gáz átalakul széndioxiddá és vízgőzzé. A reakció sebessége akkora, hogy a légkörben jelenlévő metánmennyiség folyamatos fenntartásához évente legalább egy milliárd tonna metánt kellene a levegőbe juttatni. Ráadásul szükség van valamilyen eszközre a metánoxidáció során felhasznált oxigén visszanyerésére. Az a mennyiség, amire a Föld különleges légköri keverékének fenntartásához a két gázból szükség van, legalább száz nagyságrenddel nagyobb, mint ami élettelen alapon valószínű lenne. Tudjuk, hogy a metángáz bizonyos életműködés melléktermékeként kerül a légkörbe, például a mozsarakban korhadó szerves anyagokból, az állatok és az ember bélrendszeréből stb.

A földi légkör jelenlegi összetétele, mint erre már korábban többször utaltunk, elképzelhetetlen volna a bioszféra közreműködése nélkül. Nem közömbös azonban az egyes gázok aránya sem. Itt vissza kell térnünk egy biológiai jelenségre, amit 1932-ben Cannon fogalmazott meg, és amit *homeosztázisként* emlegetnek. A homeosztázis jelensége abban áll, hogy *organikus rendszerek gondoskodnak arról, hogy a fiziológiai mennyiségek elviselhető határok között maradjanak, illetve optimális értéket vegyenek fel.* Például az emberi test hőmérséklete $36,5^\circ\text{C}$ -től alig tér el pár tizedekkel, ez az életműködés szempontjából optimális hőmérséklet. Kísérletek igazolják, hogy a szervezet ezt a hőfokot tartani tudja akkor is, ha a környezet fagyponthig hűl, vagy $+40^\circ\text{C}$ fölé emelkedik. Jól ismert, hogy alacsony hőmérsékleten a test didergéssel igyekszik hőt termelni az elveszett hő pótlására, a túlságosan meleg környezetben izzadással, vagyis párologtatással próbál szabadulni a hőfölöslegtől. Ez a homeosztázis talán legismertebb példája.

Az élőlények túlnyomó többsége *aerob*, vagyis csak levegő (oxigén) jelenlétében képes életfolyamatait fenntartani. Az *aerobiózis*, azaz a tápanyagok energiatartalmának levegő (oxigén) jelenlétében történő felszabadítása ezen élőlények életműködésének jellemzője, oxigén nélkül nem maradnának életben. Nem mindegy azonban,

hogy a levegőben milyen arányban van jelen az oxigén. A földi légkörben az oxigén 21%-át teszi ki a gázkeveréknek. Laboratóriumi kísérleteket végeztek arra vonatkozóan, hogy különböző nedvességtartalmú növényi anyagok milyen oxigénarányú gázkeverékben gyűjthetők meg, illetve égethetők el. A jelenlegi 21%-os oxigénarány esetén 15%-os nedvességtartalom felett nem keletkeznek tüzek, 5%-os vagy ennél kevesebb nedvességtartalom esetén a növényi anyagok már könnyen meggyulladnak. 25%-os oxigénarány fölött még a nedves ágak és az őserdők aljnövényzete is meggyulladna, például villámcsapás vagy öngyulladás következtében. 15%-nál kisebb oxigénszint esetén pedig tűz egyáltalán nem keletkezhetne. Ez azt jelenti hogy a növényzet megmaradása, illetve elégetősége szempontjából a levegő oxigénaránya 15 és 25% között kell, hogy maradjon. Ha az oxigéntartalom a légkörben 25% fölé emelkedne, a spontán erdőtüzek vagy öngyulladások csaknem az egész növényvilágot elpusztítanák.

Az amerikai űrhajók utaskabinjait az 1960-as évek első felében *tiszta oxigénnel* töltötték. 1967 januárjában az Apollo-program földi kísérleteit végezték, amikor rövidzárlat következtében az űrkabin belsejében tűz keletkezett. Három űrhajós tartózkodott a kabinban: *Virgil Grissom, Edward White és Roger Choffee*. Az egyik űrhajós jelezte a tüzet, a kabin ajtajának kinyitásához azonban 90 másodperc kellett volna. Az űrkabin néhány másodperc alatt lángtengerré változott, a három űrhajóst nem lehetett megmenteni. A NASA levonta a tanulságot a katasztrófából, többé nem használnak tiszta oxigént, hanem normális levegőt az űrhajók belsejében.

Ez a tragédia jól szemlélteti, hogy az életet fenntartó oxigén milyen nagy veszedelemmé válhat, ha nincs megfelelően „beszabályozva”. Láttuk az 5. fejezetben, hogy a földi légkör kialakulása során az oxigénszint kezdetben igen alacsony volt, és az élet megjelenése után kezdett lassan növekedni. Az élet kezdetleges formái ezért lényegesen különböztek a mostani formáktól. A bioszféra fokozatosan alkalmazkodott a változó légkörhöz, miközben maga alakította olyanná, amilyen.

A Gaia-hipotézis alaptétele, hogy a légkör a bioszféra része, mint ahogy a diónak része a dióhéj. A kettő egymást föltételezi és együttfejlődnek ki. A bioszféra és a légkörre való kiterjesztése új megvilágításba helyezi a bolygómelekedést is. A légszennyeződésre a bioszféra alkalmazkodni és reagálni tud. Amennyiben olyan légkört terhelünk a szerves tüzelőanyagok elégetésének termékeivel, amelyet a bioszféra szabályoz, az eredmény jelentősen eltérhet attól, mint amit passzív, szervesetlen légkör esetén kapnánk. Alkalmazkodó változások mehetnek végbe, amelyek a zavarokat, mint például a szén-dioxid felhalmozódása, csökkenthetik.

Bolygónk nemcsak légkörének összetételében különbözik a naprendszer többi tagjától, hanem abban is, hogy felszínének több, mint 70%-át víz borítja, mégpedig folyékony víz, amely különböző anyagok, gázok, sók oldására képes. A tengerek és óceánok vizének térfogata mintegy 1300 millió km^3 , a tömege $1,3 \cdot 10^{18}$, azaz 1,3 trillió tonna. Ha az óceánokban Gaiát keressük, – írja LOVELOCK (1991) – ésszerű kiindulási pont lehet a kérdés, hogy vajon miért sós a tenger. Az egykor meggyőződéssel vallott válasz valahogy így hangzik: „a tenger azért lett sós, mert az eső és a

folyók folyamatosan apró sómennyiségeket mostak a tengerbe a szárazföldről. Az óceán felszíni vizei elpárologtak, majd esőként a szárazföldre jutottak, a só azonban mindig visszamaradt a tengerben, és ott felhalmozódott.”

A tengerek átlagos sótartalma jelenleg 3,4%, a vérünké csak 0,8%. A magyarázat: az élet kezdetén a tengeri élőlények belső folyadékai egyensúlyban voltak a tengerrel, vagyis a szerves folyadékok és környezetük sótartalma pontosan megegyezett. Később, az evolúció során az élőlények egy része a szárazföldek meghódítására indult, de a szervezetük sótartalma az eredeti szinten maradt, miközben a tengeré tovább emelkedett.

A sófelhalmozódás elmélete, amennyiben megfelel a valóságnak, lehetővé teszi az óceánok életkorának kiszámítását. Tegyük fel, hogy az esők és folyók által évről évre a tengerbe mosott só mennyisége évmilliók alatt többé-kevésbé állandó maradt, ekkor a tengerek életkora egyszerű osztással kiszámítható. Évente kb. 540 millió tonna só kerül a tengerbe. A tenger vizének tömege $1,3 \cdot 10^{18}$ tonna, a jelenlegi 3,4% sótartalom mellett a tengerekben lévő só összes tömege így $4,42 \cdot 10^{16}$ tonna. Az évi gyarapodásból azt kapjuk, hogy mintegy 82 millió év kellett a jelenlegi sótartalom eléréséhez. Ez az eredmény azonban ellentmond geológiai ismereteinknek, amelyek szerint az óceánok életkora ennél jóval nagyobb.

Hogy a sótartalom az állandó utánpótlás ellenére nem emelkedett tovább a jelenlegi koncentrációnál, annak egyedül lehetséges magyarázata, hogy kell lennie egy „lefolyónak”, amin keresztül a só az óceánból éppoly gyorsan tűnik el, mint ahogyan odajut. És itt valószínűleg ismét a homeosztázis egyik formájával találkozunk. Az élőlények életben maradásának egyik feltétele, – kivéve néhány sókedvelő lényt, mint például a sórákok – hogy a környezet sótartalma ne haladja meg a 6%-ot. Ha ugyanis a sejtek sókoncentrációja lényegesen alacsonyabb (1% alatti), mint a környezeté, akkor a kémiaiából jól ismert ozmózis jelensége következik be. Ez abban áll, hogy a nagyobb sókoncentrációjú folyadék „kiszívja” a kisebb sótartalmú folyadékot. (Cseresznyeéréskor ellenkező irányú ozmózist okoz a tartós eső: a gyümölcsben lévő oldat „magábaszívja” a vizet, és a sejtek szétrepednek.) A sejtek falát alkotó membrán egy darabig ellenáll az ozmózisnak, az élő sejt megőrzi nedvességét, illetve sókoncentrációját. Ha a koncentráció különbsége az élőlény és környezete között túllep egy kritikus értéket, a membrán nem képes ellenállni az ozmózisnak, a sejtek szétrepednek.

A kérdés tehát nem az, hogy mitől sós a tenger, hanem az, hogy miért nem sósabb? Az oceanográfusok egy része a választ a sekély tengerekben, lagunákban történő sólerakódásokban keresi. A világ élő anyaga tömegének nagyjából a fele a tengerekben él, és aktívan részt vesz a tenger kémiai összetételének alakításában. Így hozzájárulhat a sókoncentráció szabályozásához is. Mindenesetre tény, hogy a tengerek átlagos sókoncentrációja nem haladja meg a kritikus 6%-ot, és úgy tűnik, a földtörténet során ez soha nem is következett be. Hogy a tengeri élővilág miként oldja meg a sókoncentráció „szabályozását”, azt pontosan nem ismerjük. Több megoldási

lehetőség is kínálkozik, de további elemzésekre volna szükség, hogy ezek realitását eldönthessük.

A bioszféra és a légkör kölcsönhatásának egy másik megnyilvánulása a földi éghajlat „szabályozása”, kis merészséggel úgy is mondhatjuk: az éghajlat komfortossá tétele. Az éghajlat, ezen belül elsősorban a hőmérséklet alakításának legfontosabb tényezői: a napsugárzás (ezen belül a napállandó, a légkör üvegházhatása, a Föld globális albedója, a Föld Nap körüli keringésének pályaelemei, a légköri homályosság), a tengerek és kontinensek eloszlása a Föld felszínén, a nagyobb hegységrendszerek.

A napállandó és a bolygó albedójának ismeretében, mint láttuk, kiszámítható a globális egyensúlyi hőmérséklet a bolygó felszínén. Ez az a hőmérséklet, amelyen a felszínről történő hosszúhullámú kisugárzás éppen egyensúlyban áll a Napról érkező (rövidhullámú) sugárzással. A jelenlegi napállandó $1370 \pm 15 \text{ W/m}^2$ * és 30%-os albedó mellett a Föld egyensúlyi hőmérséklete 255–258 K-nek adódik, azaz -18 , -15°C -nak. A tényleges földi átlaghőmérséklet $+14^\circ\text{C}$. Említettük a 4. fejezetben, hogy a mintegy 30°C -os hőtöbblet a légköri gázok üvegházhatásának köszönhető. Az élet első nyomai mintegy három és fél eonnal ezelőtt jelentek meg a Földön. Üledékes kőzetmaradványok igazolják, hogy az elmúlt három és fél eon alatt az éghajlat még rövid ideig sem vált teljesen alkalmatlanná az élet számára, azaz a bioszféra nem pusztult el, és nem keletkezett újra. Ez nem volna meglepő, ha a Nap állandó intenzitással melegítette volna a Földet ezen hosszú idő alatt. Csakhogy a Nap a csillagok tipikus fejlődésén ment keresztül, így energiakibocsátása az elmúlt három és fél eon alatt legalább 30%-kal nőtt. Ez azt jelenti, hogy az élet elterjedésének kezdetén a napállandó 30%-kal kisebb, az egyensúlyi hőmérséklet kb. 25°C -kal alacsonyabb volt a Földön. Valójában a Föld átlaghőmérséklete az élet megjelenése óta soha nem süllyedt $+8^\circ\text{C}$ alá, és nem emelkedett $+25^\circ\text{C}$ fölé. Léteznie kell tehát egy természetes „termosztátnak” amely biztosította a földi élet számára szükséges „komfort-hőmérsékletet”. Kérdés, hogy vajon mi lehet ez a földi hőmérsékletet szabályozó „termosztát”? Egyes kutatók úgy vélik, hogy az ősidőkben a Föld felszíne sötétebb volt a mainál, így a planetáris albedó is kisebb volt a jelenleginél, a napsugárzás nagyobb hányada melegítette a Földet. Ez azonban csak részben kompenzálhatta a napsugárzás hiányát.

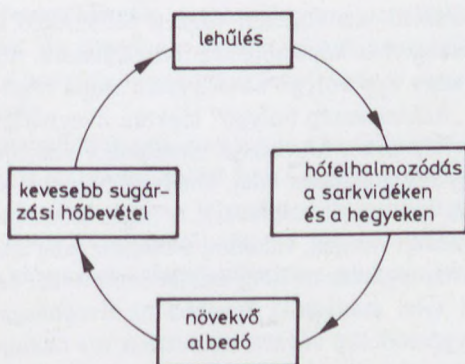
Egy másik lehetőség a földi átlaghőmérséklet szabályozására a szárazföldek és óceánok átrendeződése a Földön. DOBOSI ZOLTÁN (1973) számításokat végzett arra vonatkozóan, hogy miként változna a hőmérséklet a különböző szélességeken, ha a kontinensek kizárólag az egyenlítő mentén, illetve ellenkezőleg, kizárólag a két póluson helyezkednének el. Természetesen a kontinensek és óceánok kiterjedésének globális arányait a számítás állandónak tételezi fel. Az eredmény: ha szárazföldek az alacsony szélességeken, az óceánok a magasabb szélességeken lennének, a hőmér-

*A napállandót műholdakra, nagy magasságokba emelkedő speciális ballonokra illetve repülőgépekre szerelt műszerekkel mérik. Az egyes műszerek hitelesítése, kalibrálása azonban nem teszi lehetővé a tökéletes pontosságú mérést, ezért kb. 1%-os mérési hibával kell számolnunk.

séklet mindenütt csökkenne a Földön. Ugyanis a szárazföldek kis hőkapacitásuk és viszonylag nagyobb albedójuk miatt a trópusok sugárzásbővségét kevésbé tudnák hasznosítani, a nappali forróságot az erős éjszakai lehűlés ellensúlyozná. Fordított esetben, amikor a trópusokon kizárólag óceánok lennének, nagy hőkapacitásukkal és kicsiny albedójuk révén sok hőt tárolhatnának. Ezt a hőt azután a légáramlások szállítanák a pólusok felé, így ott is magasabb hőmérséklet uralkodna a jelenleginél.

A kontinensek és tengerek idealizált szétválása szélességi zónák szerint ugyan nem következett be a földtörténet során, a kéregmozgások azonban ténylegesen változtattak a szélességek szerinti kontinens/tenger arányokon. Így a kontinensvándorlás pár fokos hőmérsékletváltozást eredményezhetett, föltéve, hogy az elmozdulás észak–dél irányban elég jelentős volt. Ez azonban semmiképpen sem volt elegendő a napállandó 30%-kal csökkent értékének pótlására.

Az éghajlat kontrollját biztosító „termosztát” mibenlétét tehát tovább kell keresnünk. Annál is inkább, mivel a Föld-légkör rendszerben számos *pozitív visszacsatolás* lehetséges, amely a hőmérséklet „megszaladását” idézheti elő. Az egyik ilyen visszacsatolás a légkör–krioszféra kölcsönhatásából származhat. Tegyük fel, hogy valamilyen oknál fogva, például a Föld pályaelemeinek változása folytán, a nyarak hosszú évszázadok, évezredek során hűvösebbre fordulnak. A sarkvidéken és a magasabb hegyeken a télen leesett hó jelentős része nem olvad el a hideg nyári hónapokban. A hótakaró évtizedről évtizedre fokozatosan terjeszkedik. Ha évtizedenként csak 1%-kal növekszik a hó- és jégtakaró, egy évezred alatt 2,7-szeresére nő meg, mondjuk a kezdeti 50 millió km²-ről 135 millió km²-re. A hófelszín, különösen a friss hó albedója a legnagyobb a Földön, eléri a 0,7–0,9 értéket. A megnövekedett hótakaró megnöveli a Föld egészének albedóját, a napsugárzás jelentős része visszaverődik a felszínről, csökken a melegítésre fordítható energia, a hőmérséklet csökkenni kezd. A lehűlés miatt még kevesebb hó olvad el, tovább terjeszkedik a hótakaró, tovább nő az albedó, tovább csökken a hőmérséklet (21. ábra).



21. ábra. Pozitív visszacsatolás a légkör és a krioszféra között. Ez a visszacsatolás ellenkező irányú is lehet, pl. az interglaciálisok idején, amikor melegedés vagy hóolvadás az indító tényező

Ha a napsugárzás 1–2 eonnal ezelőtt néhány százalékkal gyengébb volt a jelenleginél, és ha a tengerek, felszíni vizek már léteztek, akkor a pozitív visszacsatolás révén a Föld hőmérsékletében olyan tartós, egyirányú változásnak kellett volna bekövetkeznie, amely egy halott, jéggé dermedt világot eredményezne a Földön. Ilyen fagyott világ van a Marson. Változatlan napsugárzás mellett, a Föld albedójának 0,3-ról 0,5-re való növekedése esetén, a globális egyensúlyi hőmérséklet 24 °C-ot csökkenne.

A légköri szén-dioxid legnagyobb fogyasztója az óceán, évente 90 milliárd tonna CO₂ kerül a tengerekbe, igaz, hogy csaknem ugyanennyi vissza is jut az anyag körforgása révén a légkörbe. Azonban a tenger CO₂ befogadóképessége növekvő hőmérséklettel csökken. Ha tehát a földi éghajlat tartósan fölmelegedne, a melegedést bizonyos késéssel a tenger fölmelegedése kísérné, ennek következtében a CO₂ tengerek által történő fogyasztása is csökkenne. Tegyük fel, hogy az óceán fölmelegedése miatt a CO₂-fogyasztása évente egy százalékkal csökken, akkor minden más anyagcserét állandónak véve, a légköri CO₂ mintegy 2200 év alatt megduplázódna. Ezzel fokozódna az üvegházhatás, a tenger tovább melegedne, és évmilliók elteltével a Földön a Vénuszéhoz hasonló forró éghajlat alakulna ki.

Pozitív visszacsatolás. Egy okkal több, hogy elfogadjuk: kell léteznie olyan szabályozó rendszernek, amely megakadályozza a hőmérséklet „megszaladását”.

LOVELOCK a homeosztázis tényét a földi éghajlatban a következőképpen bizonyítja. Amint az emberi test belső hőmérséklete, a környező hőmérséklet széles határok közötti ingadozása ellenére, az optimális 36,5 °C közelében marad, ugyanúgy a Földön is van egy zóna, amely mindig megőrizte az élet számára elviselhető hőmérsékletet. A jégkorszakok során az eljegesedés még a legnagyobb kiterjedésekor sem lépte túl a 45. szélességi kört. Az északi és déli 45° szélesség között van a földfelszín 70%-a. A jégkorszakok tehát legfeljebb a Föld 30%-át benépesítő növény- és állatvilág életét befolyásolták.

Figyelemreméltó elméleti számításokat végzett MÉSZÁROS E. és PÁLVÖLGYI T. (1990) az élővilág hőszabályozó képességének illusztrálására. Abból az egyszerű feltevésből indulnak ki, hogy egy bolygó növényzetét csupa fehér és fekete százszorszép virág alkotja. A „Százszorszép bolygó” légköre üvegházgázokból áll, ezeket a gázokat a növényzet fejlődésekor fogyasztja, elhalásakor visszajuttatja a légkörbe. A bolygó felszínének egy része csupasz talaj, amelyről aeroszol kerül a légkörbe. Az aeroszol a napsugárzás egy részét visszaveri. A „Százszorszép bolygó” albedója a fehér és fekete százszorszép virágok, valamint a csupasz talaj arányától függ, hőmérséklete pedig, állandó napsugárzás mellett, az albedótól (fehér és fekete százszorszépek illetve a csupasz talaj arányától), továbbá az üvegházgázok és az aeroszol mennyiségétől. A bolygómodellre végzett számítások azt mutatják, hogy a bioszféra stabil egyensúly kialakítására törekszik, amelyben a fehér és fekete százszorszépek 50–50%-arány körül borítják a felszínt, a hőmérséklet pedig a bioszféra számára elviselhető értéken stabilizálódik.

A biológiai termosztát a „Százszorszép bolygón” vázlatosan így működik: Tegyük fel, hogy a százszorszép virág csupán $+8$ és $+26$ °C hőmérsékleti határok között képes fennmaradni. Másrészt a központi égitest (Nap) évmilliárdos csillagfejlődése során egyre erősebb sugárzást bocsát ki, asztrofizikai ismereteink szerint ui. a csillagok fejlődésük bizonyos fázisában növelik fényességüket. Az erősödő sugárzás hatására emelkedik a bolygó hőmérséklete, és amikor eléri a $+8$ °C-ot, megjelenik a bolygón a virág. De a fekete változat (kisebb albedójú lévén) erősebben melegszik illetve melegíti közvetlen környezetét, ezért szaporodási rátája meghaladja a pusztulási rátát. Másszóval a kezdeti alacsonyabb hőmérsékleten gyorsan növekszik a fekete változattal borított terület aránya. A fehér változat környezete hűvösebb, gyarapodási rátája kicsiny marad. A fekete változat terjeszkedése miatt csökken a bolygó albedója, nő a globális hőmérséklet. Egy bizonyos hőmérséklet elérése után a helyzet megfordul: a fehér változat kezd gyorsabban szaporodni, egyre nagyobb területet hódít meg a bolygó felszínén, ezzel növekszik a globális albedó, és a hőmérséklet stabilizálódik; a fokozatosan erősödő besugárzást kompenzálja a növekvő albedó. Ez a hőszabályozás azonban, bár hosszú ideig működhet, egyszer véget ér. A központi égitest (Nap) sugárzásának erősödését a megnövekedett albedó sem tudja kompenzálni. A hőmérséklet a felső küszöb fölé emelkedik, és a százszorszép virág mindkét változata elpusztul. A modell Watson és Lovelock egy korábbi kísérletének továbbfejlesztése.

Befejezésül LOVELOCKnak (1991) még egy gondolatát idézzük. Ha a központi égitestünk, a Nap kisugárzó felszíne 6000 K helyett például csak 1000 K lenne, kereken ezerháromszázszor kevesebb hőt sugározna ki. Továbbá, ha Földünk ennek megfelelően olyan közel lenne a Naphoz (kereken harminchatszor kisebb távolságban keringene), hogy a Földre a jelenleginek megfelelő hő érkezzon, vagyis a napállandó 1370 W/m^2 maradjon, a jelenleg ismert élővilág akkor sem tudna kialakulni és fennmaradni. A növények ugyanis a fotoszintézishez meghatározott energiájú fotonokat használnak fel. A fotonok energiája pedig nagymértékben függ a kisugárzó felszín hőmérsékletétől. A földi élet fennmaradásához a megfelelő kémiai összetételű légkörön (és óceánon), az elviselhető hőmérsékleten kívül megfelelő hőmérsékletű Napra (megfelelő energiájú fotonokra) és ennek megfelelő Nap–Föld távolságra van szükség.

A fentiekben természetesen nem merítettük ki a Gaia-hipotézis minden következtetését. És talán még a legérdekesebbek közül is kihagytunk néhányat. E hiányos áttekintés így is képet adhat a Gaia jelentőségéről gondolkodásunk alakításában, a Földről mint életet hordozó bolygóról alkotott szemléletünkben. Ha a Gaia valóság, és Földünk élőlény, akkor meg is betegedhet, óvnunk kell egészségét.

8. MITŐL FÜGG A JÖVŐ ÉGHAJLATA?

8.1. AZ ELŐREJELEZHETŐSÉG HATÁRAI

Nap mint nap találkozunk különféle előrejelzésekkel. Szakemberek kísérletet tesznek a gazdasági élet várható alakulásának előrejelzésére (2. fejezet), a politikai viszonyok előrejelzésére, egy-egy háború kimenetelének előrejelzésére. A rádió, a televízió, a napilapok és a meteorológiai szolgálat jóvoltából leggyakrabban az időjárás előrejelzése jut el a széles tömegekhez. Annyira hozzászoktunk mindezekhez, hogy föl sem merül bennünk a kérdés: *mit nevezünk előrejelzésnek?*

Hamar el kell vetnünk azt a látszólag természetes választ, hogy előrejelzésen olyan közlést értünk, amely a jövőre vonatkozik. A MÁV-menetrend 365 napra előre közli a vonatok indulását, mégsem tartjuk előrejelzésnek. Ha a rádió vagy újságok közlik, hogy a jövő hónap valamely napján lezárják javítás miatt egyik hidunkat, s a forgalmat elterelik, bár ez a közlés a jövőre vonatkozik, mégsem előrejelzés, hiszen egy közigazgatási döntésről van szó, amit előre bejelentenek. Talán meglepő, de az sem előrejelzés, ha azt állítom, hogy Jeruzsálemben a jövő év három nyári hónapjában nem lesz eső, vagy a jövő évben Budapesten július hónap melegebb lesz, mint a január. Mindkét esetben egy biztos éghajlati tényt közlök: Jeruzsálemben az 1841 óta folyó mérések szerint a nyári hónapokban még sohasem hullott számottevő eső (a téli hónapokban annál több), Budapesten pedig az 1780-ig visszamenőleg rendelkezésre álló adatok szerint a január mindig hidegebb volt, mint a július.

Ha ellenben arra a kérdésre keresünk választ, hogy jövő év decemberében mennyi lesz Budapesten a havi átlaghőmérséklet, akkor erre többféle lehetőség közül kell választanunk. Az 1780 óta előfordult leghidegebb december (1879) átlaghőmérséklete Budapesten -10°C volt, a legmelegebbé $+5,6^{\circ}\text{C}$ (1826). Föltéve, hogy éghajlatunkban jövőre nem következik be olyan drasztikus változás, amilyen 210 év óta még soha nem fordult elő, akkor 16 egyfokos intervallum közül kell kiválasztanunk, előrejeleznünk azt, amelyik jövő decemberben realizálódik. Hasonlóképpen széles skálán alakulhat Magyarország valamely pontján a csapadék havi összege (helyenként 0 és 160–200 mm között). De még a jóval kiegyensúlyozottabb évi csapadékösszeg is széles határok között ingadozik: Budapesten az 1841–1990 közötti 150 év során előfordult 326 mm (1857-ben) és 989 mm (1937-ben). Egy adott évre vonatkozóan tehát sok lehetőség közül kell előrejeleznünk azt, amelyiket reálisnak tartjuk.

További példák felsorolása nélkül is érezzük, hogy a jövőre vonatkozó közlések kétfélek lehetnek: előre eldöntött, determinált, *biztos közlések*, vagy sok lehetőség

közül kiválasztandó *bizonytalan közlések*. Különösebb bizonyítás nélkül ez utóbbiakat fogadjuk el, mint előrejelzéseket. Minden közlés információátadás. Ezért, ha meg akarjuk fogalmazni, mit nevezünk előrejelzésnek, akkor információelméleti szempontból a következő definíciót adhatjuk: *Előrejelzésnek csupán azt a jövőre vonatkozó kijelentést tekintjük, amely valamely bizonytalanság csökkentésére szolgál.*

Ebben a definícióban két fontos momentum van: az egyik, hogy az előrejelzésnek egy *meglévő bizonytalansággal* kell szembenéznie, a másik, hogy célja ennek a bizonytalanságnak a *csökkentése*, vagyis a közlés után is marad bizonytalanság, de ez kevesebb kell legyen, mint közlés előtt. Ahhoz, hogy egy prognózis tökéletesen megszüntessen minden bizonytalanságot, az előrejelzendő eseménynek determinálnak kell lennie, továbbá az előrejelzést készítőknak tökéletesen ismerniük kellene a determináló tényezőket és törvényszerűségeket. A naprendszer bolygóinak és holdjainak, valamint az üstökösöknek mozgását egy központi égitest körül az égi mechanika törvényei pontosan leírják. Ezért, ha a központi égitest tömege nagyságrendekkel nagyobb a körülötte keringő bolygónál, akkor az utóbbi mozgása előre kiszámítható. Innen tudják a csillagászok „előrejelezni” a nap- vagy holdfogyatkozások időpontját, a bolygók jövőbeli pozícióját az égen, ugyanez áll az üstökösök mozgására. Fenti definíciónk szerint ez szigorú értelemben nem előrejelzés, hanem egy számítás eredménye. Ugyanúgy előre kiszámíthatjuk a földi nehézségi gyorsulás ismeretében egy szabadon eső test mozgásának jellemzőit, egy ballisztikus rakéta, egy műhold pályájának adatait és még sok ehhez hasonló eseményt.

Előrejelzésről akkor beszélünk, ha olyan jövőbeli eseményről várunk információt, amely sok és bonyolult tényezőtől függ, az esemény kimenetelét nem lehet pontosan kiszámítani. Ilyen a csillagászatban az ún. *többtest probléma*, amikor több, hasonló tömegű égitest végez bonyolult mozgást a közös és állandóan változó tömegközéppont körül. Az égi mechanika törvényei ebben az esetben csak közelítő megoldást nyújtanak, de az egyes égitestek mozgásának pontos leírása nem lehetséges. A Föld-légkör rendszer vagy éghajlati rendszer viselkedése, állapotváltozása bonyolult kölcsönhatásoktól függ. A társadalom mégis azt várja a meteorológusoktól, hogy adjanak előrejelzést az időjárásról, sőt az éghajlat jövőjéről. Talán nem egészen véletlen, hogy éppen egy csillagász, a franca tudós, *Le Verrier* vállalkozott először (1855) egy meteorológiai előrejelző szolgálat megszervezésére. Az ő nevéhez fűződik ui. a 19. század egyik legnagyobb csillagászati fölfedezése: az Uránusz bolygó pályájának rendellenességeiből, az égi mechanika törvényeinek felhasználásával kiszámította egy addig ismeretlen bolygó főbb adatait és pályáját. Számításai alapján 1846-ban távcsővel megtalálták a keresett bolygót, a Neptunuszt. Ez a szenzációs siker adott *Le Verrier*nek tekintélyt és önbizalmat, hogy párizsi központtal megszervezze a rendszeres időjárás-előrejelző szolgálatot.

A francia példát már a múlt század utolsó évtizedeiben több ország követte, napjainkban pedig alig akad ország a világon, ahol valamilyen formában ne tennének közzé időjárási előrejelzéseket. Tagadhatatlan, hogy a prognózisoknak az élet számos területén gyakorlati haszna van. Életeket, anyagi értékeket lehet megmenteni

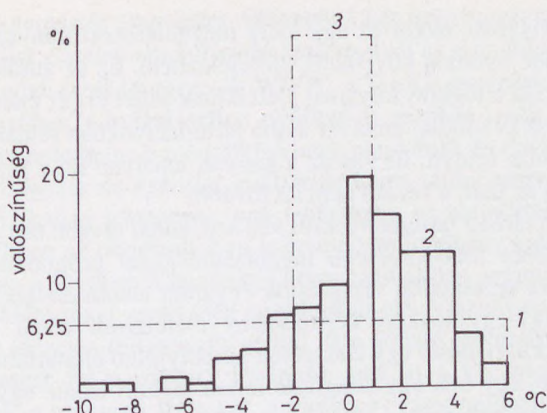
egy-egy sikeres prognózis nyomán. Ha csak a polgári vagy katonai repülésre, tengeri hajózásra gondolunk, ezek biztonsága nagymértékben az időjárás szervezett megfigyelésétől és előrejelzésétől függ. Nemzetközi előírás kötelezi a forgalmas repülőtereket meteorológiai információk és előrejelzések folyamatos szolgáltatására, illetve ilyen szolgálatok fenntartására.

De a sikerek mellett kudarcok is kísérik a meteorológiai előrejelzések készítését. Még a legkorszerűbb technikával felszerelt előrejelző központok sem képesek abszolút biztos, mindig pontosan beváló prognózisok adására. Tanulságos lehet az előrejelzések utólagos kiértékelése, különösen a sikertelenségek okainak elemzése. Az amerikai Meteorológiai Szolgálatban rendszeresen végeznek úgynevezett „post mortem” (halál utáni) megbeszéléseket, amelyek során megvizsgálják mennyiben felelt meg vagy mennyiben nem felelt meg a prognózis a valóságnak. Előfordul, hogy egy bekövetkezett légköri esemény okait még utólag sem sikerül tökéletesen tisztázni.

Egyetlen reális cél csak az lehet, hogy a légkör jövőbeli viselkedését illető bizonytalanságot a bejövő információk (mérési adatok) gondos megválogatásával, a prognosztikus módszerek tökéletesítésével minél jobban csökkentsék (3. fejezet, 5. ábra).

A bizonytalanság meghatározott föltételek mellett számszerűen is kifejezhető a statisztikai vagy Shannon-féle entrópia segítségével. A Shannon-féle entrópia lényegében azt mondja meg, hogy egy fennálló bizonytalanság megszüntetéséhez hány bit információ szükséges, még egyszerűbben: hány barkochbakérdésre adott igen-nem felelettel jutunk el a pontos információhoz. Az entrópia, vagyis a bizonytalanság akkor a legnagyobb, ha pl. x lehetőség mindegyike azonos valószínűséggel következhet be. A bizonytalanság csökken, ha az x számú lehetőség közül egyesek valószínűsége növekszik, a többi lehetőségé csökken. A budapesti decemberi középhőmérséklet az adatok szerint $+6$ és -10 °C között változhat, azaz 16 egyfokos intervallum közül bármelyik bekövetkezhet. Ha valamennyi egyfokos intervallumban azonos arányban fordultak elő mérési adatok, azaz minden egyes értékköznek $1/16$ -od a valószínűsége, akkor a bizonytalanság 4 bit. (Négyszer kell feleznünk a 16 fokos skálát, hogy egyfokos értékközig eljussunk.) A valóságban a decemberi középhőmérsékletek leggyakrabban -2 és $+4$ °C között fordulnak elő, ezen belül is kiemelkedik a 0 és $+1$ °C közötti értékek gyakorisága, míg a szélsőségek felé haladva a valószínűség egyre kisebb. Ezért a decemberi átlaghőmérsékleteket illető bizonytalanság 4 bitnél kevesebb, pontos számítások szerint 3,3 bit. Az előrejelzés arra vállalkozik, hogy bizonyos hőmérsékleti értékek valószínűségét kiemeli, a többi értékeket csökkenti. Hasonló a feladat egyéb meteorológiai elemek, csapadék, felhőzet, szél előrejelzésekor.

A 22. ábra szemlélteti, hogy újabb és újabb információk megszerzésével miként szűkíthető a lehetőségek skálája, és miként növekszik közben a lehetséges válaszok valószínűsége, ezáltal hogyan csökken az adott kérdésre adható válaszok bizonytalansága. Az 1-es diagram azt fejezi ki, hogy csupán a két szélsőértéket ismerjük,



22. ábra. A december havi középhőmérsékletek valószínűsége Budapesten

Jelölések: 1 – ha a két szélsőérték (–10 és +6 °C) között bármely egyfokos értékköz azonos, 1/16 valószínűséggel volna várható; 2 – a 200 éves mérési sorozatból kapott tényleges valószínűségek (gyakoriságok);

3 – az előrejelzés által szűkített intervallum megnövelt valószínűséggel

vagyis a lehetőségek teljes intervallumának kiterjedését, de még semmit sem tudunk a szűkebb értékközök különböző valószínűségéről. A bizonytalanság ekkor a legnagyobb. A 2-es diagram az éghajlati adatok előfordulásának gyakoriságát (jó közelítésben valószínűségét) mutatja. Nyilvánvaló, hogy ennek ismeretében csökken a bizonytalanság, hiszen egyes értékközök jóval gyakoribbak, mások gyakorisága elenyészően kicsiny. Az előrejelzés tovább szűkíti a várható értékek intervallumát, és növeli ezek valószínűségét, amint ezt a 3-as diagram mutatja. Az utóbbi diagramot a gyakorlatban úgy szerkeszthetjük meg, hogy elegendően nagy számú (pl. kísérleti) prognózis beválási gyakoriságait százalékban kifejezzük.

Ezen kissé talán elvont tárgyalás után vegyünk egy könnyen érthető hasonlatot a meteorológiai előrejelzések korlátainak szemléltetésére. Amikor éjszaka gépkocsival haladunk autóúton, az előrevetődő reflektorfényben a vezető látja az út egy jókora szakaszát. A közelebbi tárgyakat tisztábban látni, a távoliabbakat egyre homályosabban, de valamelyest kivehetően. Ha azonban az autót elkanyarodik, akkor a kanyaron túl már a reflektorfény sem világítja meg az utat, a vezető nem lát tovább a kanyarnál.

A légköri folyamatok mindig valamilyen energiaátalakulással járnak. A felhőkben a vízgőz kondenzációs hője szabadul fel, és alakul hővé, azontúl pedig mozgássá. A hideg és meleg légtömegek átrendeződésekor ezek potenciális energiájának egy része alakul át mozgási energiává. A mobilizálható energiakészletek a légkör kisebb-nagyobb tartományaiban halmozódnak fel, a tartományok körülhatárolhatók, a bennük lévő energiakészletek korlátozottak. Ha megindul egy folyamat a légkör

valamely tartományában, akkor ez egy ideig meghatározott irányban halad, tendenciája többé-kevésbé nyomon követhető, előrejelezhető. Ez az autóút egyenes szakaszának felel meg. Ha a légköri folyamat életriklusa véget ér (az energiakészlet kimerül), egy új szakasz kezdődik, amelyet újabb tartományokban felhalmozódó energiakészletek átalakulása irányít. Itt van az a kanyar, amelyen túl a reflektor fénye már nem világítja meg az utat, a vezető nem lát tovább.

Minél nagyobb térbeli tartományokról van szó, annál tovább tart a folyamat, annál hosszabb időre lehet több-kevesebb megbízhatósággal prognózist adni. Elméleti modellkísérletek és tapasztalati vizsgálatok egyaránt alátámasztják ezt a megállapítást. Ugyanígy egy-egy légköri képződmény életriklusa annál hosszabb, minél nagyobb a térbeli kiterjedése: egy elszigetelt gomolyfelhő élettartama 5–10 perc, egy lokális zivataré kb. egy óra, egy átlagosan fejlett légköri fronté egy-három nap, egy mérsékeltövi cikloné néhány nap vagy egy-két hét stb. Nyilvánvaló, hogy a nagyobb képződmények tehetetlensége is nagyobb, fejlődésük, életriklusuk is tovább tart. De az is nyilvánvaló, hogy minél finomabb időbeli részleteket akarunk előrejelezni, annál rövidebb időre kell korlátozni a prognózis érvényességét. Az éjszakai autózás hasonlatánál maradva, a távolság növekedésével a reflektor fénye egyre jobban szóródik, elnyelődik, a tárgyak képe egyre elmosódottabb lesz.

Az előrejelezhetőségnek tehát szükségképpen korlátai vannak. Ez egyrészt a Föld-légkör rendszerről szerzett ismereteink korlátozottságából fakad; lehetetlen minden adatot összegyűjteni a rendszer pillanatnyi, kiindulási állapotának pontos leírására, lehetetlen abszolút pontossággal és számszerűen megfogalmazni valamennyi tényező hatását a légköri folyamatokra. Másrészt a légköri folyamatok fejlődése a kiindulási és a környezeti feltételektől függ, ezek a feltételek pedig csak bizonyos ideig maradnak meg, amint a környezeti feltételek változnak, a fejlődés is új irányt vesz.

Ennek az alfejezetnek megírására az késztetett, hogy hosszú évtizedeken át tapasztaltam: a meteorológust sokan kétlábon járó automatának tekintik, aki bármikor azonnal felelni tud bármely kérdésre az időjárás jövőjét illetően, legyen szó a világ tetszőleges pontjáról és tetszőleges jövőbeli időpontról. Természetesnek vesszük, hogy az orvos előbb diagnózist készít, csak azután állapítja meg a szükséges terápiát. A meteorológusnak, sokak elvárása szerint, ne legyen szüksége diagnózisra, húzza elő a zsebéből a mindig naprakész prognózist. Hogyan terjedt el ez a teljesen alaptalan várakozás, nem tudom, de mindent el kell követni felszámolására.

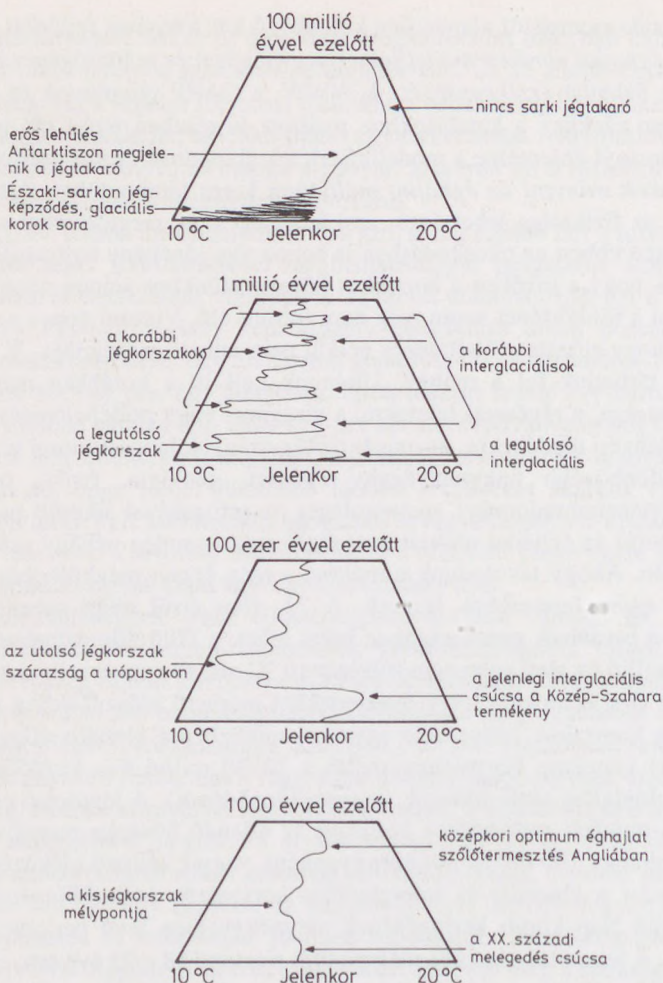
8.2. AZ ÉGHAJLAT MÚLTJÁNAK TANÚSÁGAI

A történelemben minden kornak megvoltak a maga égető problémái. A mi korunk egyik ilyen problémája az éghajlat jövője. Energia- és élelmiszer-termelésünk erősen függ az éghajlattól, s mint az előzőekben láttuk, nehezen kiszámítható módon visszahat az éghajlat alakulására. Az éghajlat jövőjének kutatása sürgető feladattá vált.

Ez a kutatás egymástól alapvetően különböző két irányban fejlődött ki. Az egyik irányzat az éghajlat elméleti modelljeinek segítségével és számítógépes kísérletekkel vizsgálja az éghajlat érzékenységét. A WWW, a GARP programok és az Éghajlati Világprogram ezekhez a kutatásokhoz nyújtott és részben nyújt ma is segítséget. Külön tanulmányt érdemelne a modellkísérletek alapjainak és eredményeinek ismertetése. A másik irányzat az éghajlat múltjában keres támpontokat. Ami a múltban megtörtént, az fizikailag lehetséges, ami lehetséges, az megtörténhet a jövőben is. Természetesen ebben az okoskodásban is benne van jónéhány hallgatólagos föltételezés, pl. az, hogy a jövőben a kozmikus környezetünkben semmi olyan dolog nem történik, ami a földtörténet során még nem fordult elő. Viszont éppen az előző részben láttuk, hogy előzetes föltételezés nélkül nem adható előrejelzés. A nagy kérdés az, miként tárhatjuk fel a múltat? Utnaunk kell itt a korábban már emlegetett „proxy” adatokra, a régészeti leletekre, a virágpor- vagy pollenelemzésre, a fák évgűrűire, a tengeri üledékekre, az oxigénizotóp-arányok laboratóriumi vizsgálatára.

A legkülönbözőbb tudományágak: régészet, geológia, fizika, oceanográfia, botanika, történelemtudomány, meteorológia összefogásával sikerült nagy vonalakban megismerni az éghajlat múltját ezer évtől száz-, esetleg néhány százmillió évre visszamenően. Ahogy távolodunk a múltba, a még éppen megkülönböztethető időléptékek is egyre hosszabbak lesznek. A 23. ábra erről nyújt szemléltető képet. Amennyire a becslések pontosságában bízni lehet, a Föld átlaghőmérséklete a legutolsó százmillió év alatt soha nem süllyedt 10 °C alá, és nem emelkedett 20 °C fölé. Ugyanakkor évszázadokkal vagy évezredekkel mérhető időszakokban tartós meleg illetve hideg korszakok váltogatták egymást, miközben a globális átlaghőmérséklet 5–8 °C-ot is változott. Figyelemre méltó a 10–30 millió éve kezdődött általános lehűlés (geológiaiailag aktív időszak, hegységképződések). A legutolsó egymillió évben, miután mindkét sarkvidéken kialakult az állandó hósapka megnövelve a Föld albedóját, mintegy 100 (40 és 20) ezer évenként, vagyis változó időközönként váltogatták egymást a glaciális és interglaciális korszakok, amit *Milanković* elmélete szerint a Föld Nap körüli keringésének pályaelemeiben lévő periodicitással lehet magyarázni. A legutolsó glaciális mélypontját mintegy 18 ezer éve érte el, míg az ezt követő interglaciálisban a hőmérséklet kb. 5 ezer évvel ezelőtt tetőzött. A kis jégkorszaknak nevezett átmeneti lehűlés az 1400-as években kezdődött, és a múlt században ért véget, okát egyesek a naptevékenység évszázadokig tartó elcsendesedésében keresik (Maunder-minimum).

Az éghajlat hosszabb-rövidebb ingadozásai megváltoztatták egy-egy régió növény- és állatvilágát. Ezen a téren a hazai kutatók közül kiemelkedő munkát végzett KORDOS LÁSZLÓ (1979), aki eredményeit más európai országokban föltárt adatokkal is egyeztetni törekedett. És itt érkezünk el a mezőgazdaság neuralgikus pontjához. Élelmiszer-termelésünk a jelenlegi éghajlathoz alkalmazkodott. Ha éghajlatunk tartósan és egyirányban változna, át kellene térni más kultúrnövények termesztésére és esetleg más állatok tenyésztésére. A mesterséges klímakamrákban, *fitotronokban* a valóságos éghajlatot programozzák be, az ehhez legjobban igazodó növényfajták ki-



23. ábra. A Föld éghajlatának ingadozásai különböző időskálákon

tenyésztésére törekszenek. Az eddig megfigyelt napfényadatokhoz, hő- és nedveségviszonyokhoz alkalmazkodó növényfajták megtalálása hosszú évek munkájába került. Az éghajlat megváltozásával ez a munka gyakorlatilag kárba vész, a fitotrokokkal végzett kísérleteket módosítani kell, gyakorlatilag előlről kell kezdeni.

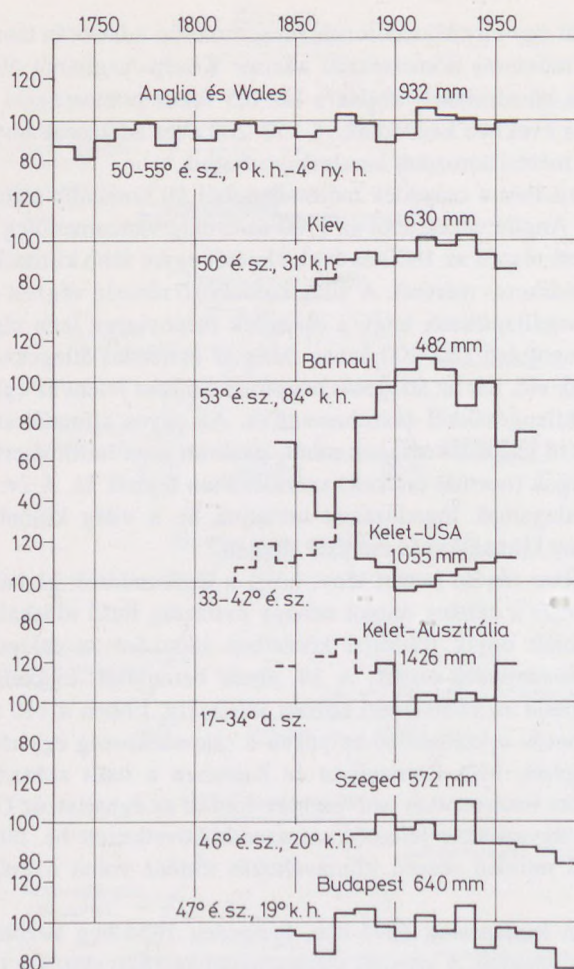
Észrevehettük, hogy mindeddig az éghajlatváltozásokon elsősorban a globális klíma változásait értettük, azaz figyelmünket a földi átlaghőmérséklet vagy más klímaelem földi méretű változásaira koncentráltuk. Gazdasági életünk azonban helyhez kötött, termelésünket a szűkebb környezetünk éghajlata befolyásolja. Adott földrajzi

környezet éghajlatát egy-egy klímaállomás hosszú mérési adatsorán tanulmányozhatjuk. Leghosszabb műszeres hőmérsékleti adatsor Közép-Angliából áll rendelkezésünkre, ahol a mai hőmérsékleti skálákra kb. 0,5 fokos pontossággal átszámítható mérések az 1600-as években kezdődtek. A 150–200 éves adatsorok birtokában jóval több klímaállomás mérési sorozatát tanulmányozhatjuk.

A hőmérséklet mellett a csapadék mérésadataiból áll hosszabb sorozat rendelkezésünkre. Ebben is Anglia vezet, ahol az 1700-as évekig visszamenőleg találunk adatokat. Az USA keleti részén az 1800-as évek elejétől egyre több klímaállomás kezdte meg a csapadék rendszeres mérését. A világ különböző részein végzett sok évtizedes mérések alapján megállapítható, hogy a csapadék mennyisége igen tág határok között ingadozott a legutolsó 150–200 évben. Még az évtizedes átlagokban is jelentős változások fordultak elő, bár az átlagolás nagyfokú simítást jelent az egyes évek adataiban jelentkező kilengésekkel összehasonlítva. Az egyes klímaállomásokon mért ingadozásokat, eltérő csapadékoságuk miatt, gyakran nem milliméterben, hanem a több évtizedes átlagok (normál értékek) százalékában fejezik ki. A 24. ábrán a csapadék évtizedes átlagainak ingadozásait mutatjuk be a világ különböző részéről összegyűjtött néhány klímaállomás mérései alapján.

A meteorológiában régóta ismert tény, hogy a légáramlások globális rendszere, az *általános légkörzés* a néhány naptól néhány évtizedig tartó időskálákon *ingadozásokat mutat*. Emiatt egyik földrajzi körzetben időnként az átlagosnál több, a másikon kevesebb csapadék hullik. A 24. ábrán bemutatott csapadéksorok nagy része magában foglalja az 1850–1960 közötti időszakot. Ebben a 110 éves szakaszban jól megfigyelhetők a különböző helyeken a csapadékoság egyirányú és ellentétes irányú kilengései. Míg Barnaulban és Kijevben a múlt század közepétől a 20. század első felére határozottan nedvesebbé fordult az éghajlat, az USA és Ausztrália keleti részén ugyanekkor jelentős szárazodás következett be. Nincs tehát szó arról, hogy a Föld minden részén klímaváltozás történt volna a csapadékoságot illetően.

Magyarországon Budapesten 1841-ben, Szegeden 1854-ben kezdtek rendszeres csapadékméréseket végezni. A szegedi sorozat azonban 1870 előtt két ízben pár évre megszakadt, így folytonos mérési adatsor csak 1870-től áll rendelkezésre. Rendkívül figyelemreméltó, hogy az *1841–90 közötti 50 évre a szélsőséges csapadékviszonyok voltak a jellemzőek*. Szegeden 1855-ben 979, 1857-ben 267 mm csapadékot mértek. Budapesten 1857-ben 326, 1863-ban 357 mm csapadék hullott, míg 1878-ban, 1880-ban, 1881-ben és 1882-ben rendre 824, 855, 864 illetve 896 mm. *A következő 50 év, 1891-től 1940-ig Szegeden és Budapesten a legnedvesebb fél évszázad volt*, Szegeden 577, Budapesten 639 mm átlaggal. A legutolsó, 1941–1990 közötti fél évszázad viszont mindkét helyen a *legszárazabb* időszak volt, Szegeden 502, Budapesten 574 mm-es átlaggal. Amennyiben ez a kerek 50 éves szakaszosság a jövőben folytatódik, akkor 1991-től egy, az előzőnél jóval csapadékosabb időszak kezdődik. Hasonló szakaszosságot mutat a Közép-Ázsiában fekvő Barnaul csapadéksora, csak itt a kilengések jóval nagyobbak (24. ábra).



24. ábra. A csapadék évtizedes átlagainak változása az 1900–1939 közötti 40 év átlagának %-ában a világ különböző részein (Szeged és Budapest kivételével H. H. LAMB 1976 nyomán)

Az éghajlat múltbeli ingadozásainak értelmezésekor választanunk kell: vagy megelégszünk egyszerű, könnyen áttekinthető magyarázatokkal, vagy megérteni törekszünk az éghajlati rendszer öt komponense között működő bonyolult kölcsönhatások olyan részleteit, amelyekről nincsenek pontos ismereteink. Egy dolgot bizonyosan állíthatunk, azt, hogy az éghajlat az emberi tevékenység nélkül is változott. A 10–30 millió évvel ezelőtti lezajlott hegyképződés nyomán jelentős lehűlés kezdődött az egész Földön, ennek mértéke a közepes szélességeken megközelítette a 20 °C-ot, de

globális átlagban is 10 °C körüli értékű volt. Előbb a Déli-, majd később az Északi-sarkvidéken kialakult az állandó hótakaró. A *Milanković-elmélet* abból indul ki, hogy amikor a Föld pályaelemei úgy alakulnak, hogy nyáron kevesebb sugárzás jut a magasabb szélességekre, akkor a hó kevésbé olvad el nyáron, a hótakaró fokozatosan kiterjed, a Föld albedója nő, a napsugárzás egyre nagyobb része verődik vissza a világűrbe. Az önmagát gerjesztő lehűlés addig tart, amíg a Föld pályaelemeinek periodikus változása nem vált előjelet, azaz amíg nem kezd növekedni a nyári sugárzásintenzitás. Amint a nyarak melegedni kezdenek, a hótakaró lassan fogyatkozni kezd, az albedó csökken, több napsugárzás marad melegítésre a Földön. Így váltják egymást az utolsó mintegy 10–20 millió évben a glaciálisok és interglaciálisok. A valóságban megfigyelt lehűlések időszakainak mintegy 80–85%-a a legutolsó 600 ezer évben megegyezik a *Milanković* által kiszámított időpontokkal. Tökéletes egyezést azért nem várhatunk, mert a csillagászati okok mellett egyéb tényezők is közreműködhetnek a hőmérséklet alakításában, például a vulkánosság aktívabb szakaszai, amikor a vulkáni por felhalmozódik a légkörben, csökkentve annak átlátszóságát, és más okok is közrejátszhatnak.

A Szahara középső része 4–4,5 ezer évvel ezelőtt jóval esősebb volt, mint a legutolsó évezredekben. A szárazodás okát aligha kereshetjük az emberi tevékenységben, hiszen az átlagos népsűrűség igen alacsony volt a Földön és változás nemcsak a Szahara éghajlatában következett be ebben az időben, hanem például Indiában is, ahol jelentősen csökkent a monszunesők mennyisége, míg az amerikai Nagy Sóstó vidékén az éghajlat nedvesebbé fordult.

Igen változékony az általános légkörzés is, amit számos „boszorkánykonyha” befolyásol, amint a GARP alprogramok tárgyalásakor láttuk. Megfelelő adatok hiányában aligha tudjuk megmagyarázni azt a változást, amely a 700-tól 1350-ig terjedő időszakban következett be a Csendes-óceán trópusi vidékein, pontosabban Polinézia szigetvilágának területén. Ebben a mintegy 650 évig tartó korszakban a keleti passzátszeleket nyugati szelek uralma váltotta fel. A népvándorlás ugyanis ekkor nyugatról kelet felé haladt a szigeteken, ami a korabeli vitorlázástechnika mellett csak úgy képzelhető el, hogy a szélirány megfordult, azaz keletiről nyugatira változott.

Minden okunk megvan tehát annak elfogadására, hogy mind a légkör összetételében, mind az éghajlat ingadozásában vagy tartós megváltozásában természetes okok is közrejátszanak. Az élővilág, a flóra és a fauna pedig nagyfokú alkalmazkodóképességet mutat a változásokkal szemben.

8.3. AZ ANTARKTISZ ÉS GRÖNLAND JÉGTAKARÓJA

Az eddigiekben csak futó említés történt a Föld-légkör rendszer egyik összetevőjéről, a krioszféráról. Volumenét, jelentőségét tekintve a globális hó- és jég takarót

három részre különíthetjük el: az Antarktiszra, Grönlandra és a magashegységek gleccsereire. Ezek főbb jellemzői:

	Antarktisz	Grönland	Gleccserek	
terület	12–16	2,1	0,55	10 ⁶ km ²
térfogat	29	2,9	0,1	10 ⁶ km ³
borjazás	2200	255	–	10 ¹² kg/év
elfűvás	10	280	–	10 ¹² kg/év

Fontos megjegyezni, hogy a fenti adatok becslült értékek, egyes szerzők becslései ezektől akár 15–20%-kal is eltérnek. Bizonytalanságot okoz egyrészt a mérések hiányos volta, továbbá az, hogy a hó- és jégtakaró évszakosan is változik, és ez a változás egyes esetekben igen jelentős lehet. Így például az Antarktisz jégtakarója a környező tengerekre is kiterjed; a tengeri jég területe a tél végén elérheti a 20 millió km²-t, míg nyáron 4 millió km²-nél kisebbre zsugorodik.

A két legnagyobb térfogatú jégtakaró a jéghegyborjazzással (jéghegyek leválása az egységes tömből a tengerbe) és szél által történő elfűvással évente veszít tömegéből. Ezt a veszteséget az évente lehulló csapadék többé-kevésbé kompenzálja.

Az elmúlt száz esztendőben tapasztalt fölmelegedés nyomán fölvetődött a kérdés: mi lesz, ha a melegedés hatására a sarki hó- és jégsapka elolvad? Hozzá kell tenni, hogy az északi sarkvidék közelében évszázadunk első felében több fokot tett ki a fölmelegedés, szemben a globális átlagban mért néhány tized fokkal. Ennek a kérdésnek megvizsgálására az USA Energiaügyi Minisztériuma több bizottságot szervezett. Itt elsősorban a tenger szintjének valódi és számítható emelkedése bír gyakorlati jelentőséggel. Ha ugyanis abból a szélsőséges föltételezésből indulunk ki, hogy az Antarktisz teljes hó- és jégtömege elolvadna, akkor a világóceán szintje 79 m-rel emelkedne. Ha Grönland teljes jégtömege elolvadna, akkor a tengerszint 7–8 m-t emelkedne, a hegyvidéki gleccserek teljes elolvadása a tenger szintjét kb. 28 cm-rel emelné meg. A rendelkezésre álló, korántsem teljes adatok alapján a kutatók arra az eredményre jutottak, hogy a múlt század végétől 1985-ig a tenger szintje 10–12 cm-t emelkedett. Az évi emelkedés a legmeredekebb szakaszon, 1920 és 1970 között elérte 2,4 mm-t. A múlt század végén és a 20. század elején a tenger szintje átmenetileg csökkent.

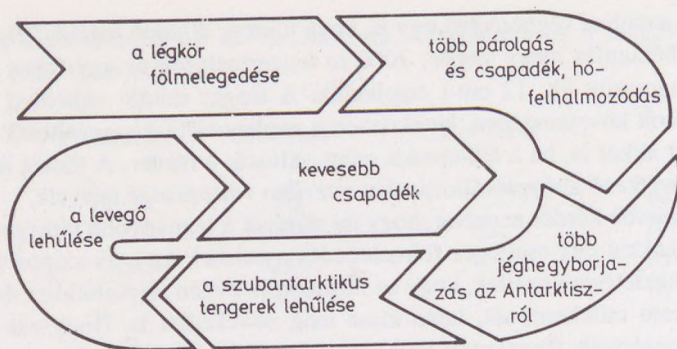
Érdemes itt megemlíteni, hogy az utolsó jégkorszakot követően, a legutolsó 12 ezer év alatt a tengerszint számos mérés tanúsága szerint 40–50 métert emelkedett. A glaciálisok és interglaciálisok váltakozásának természetes velejárója a tengerszint jelentős ingadozása: a glaciálisok idején a tengerszint csökken, interglaciálisok idején emelkedik.

A legutolsó 70–100 évben történt tengerszintemelkedés magyarázatát illetően nincs egységes álláspont. Kétségtelen, hogy a gleccserek a múlt század végétől folyamatosan visszahúzódtak, olvadékvizük belekerült a tengerekbe. A tengerszint

emelkedése azonban végbemehet úgy is, hogy tömege állandó marad. Például fölmelegedéskor hőtágulás megy végbe; 2000 m tengermélység és egy fokos melegedés esetén a tengerszint kb. 12 cm-t emelkedik. A tenger szintje változhat tektonikus kéregmozgások következtében, ha eközben a medencealjzat megváltozik. Változhat a tengerszint akkor is, ha a leülepedés miatt változik a meder. A tömeg állandósága mellett bekövetkező térfogatváltozásokat *szerikus változásnak* nevezik.

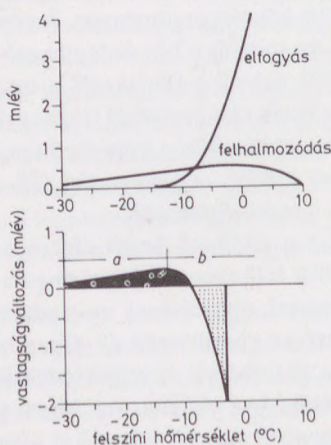
A legfontosabb kérdés azonban, hogy mi történik a legnagyobb tömeget képviselő sarki jégsapkákkal egy esetleges fölmelegedés nyomán? Az igen alapos vizsgálatok arra a következtetésre vezettek, hogy az utolsó száz évben az Antarktisz és Grönland jégtömege nem csökkent, sőt, talán kissé még növekedett is. Hogy ezt a váratlan eredményt megértsük, figyelembe kell vennünk a következő tényeket. Az Antarktisz felszínének átlagos tengerszint fölötti magassága 2300 m, több mint bármelyik más kontinensé. Részben ennek köszönhető, hogy az Antarktiszon az évi átlaghőmérséklet -11 és -55 °C között alakul. A legmelegebb hónap a január -2 és -33 °C-os havi átlaghőmérséklettel. Ahhoz, hogy jelentős olvadás induljon meg az Antarktiszon, a hőmérsékletnek fagypont fölé kellene emelkednie legalább két-három hónapon át. A helyenként 2500–3000 m magas jégplatókon ehhez 15–25 fokos melegedésre lenne szükség a nyári hónapokban. Grönlandon az évi középhőmérséklet -4 és -29 °C között váltakozik, a nyári hónapokban a tengerpartokon $+4$, $+8$ °C-os átlaghőmérsékletek is előfordulnak. Az 1000–2000 m magas fennsíkon természetesen itt is -10 °C körüli a nyári hónapok hőmérséklete. Jelentős olvadáshoz tehát az Antarktiszon legalább 15, Grönlandon kb. 10 fokos melegedésre volna szükség. Ha a tényleges melegedés ennél kisebb, akkor egy negatív visszacsatolás jön létre. Tegyük fel, hogy a Föld éghajlata melegszik (üvegházhatás), emiatt az Antarktiszon (Grönlandon) néhány fokkal megemelkedik a hőmérséklet. A melegebb levegő több vizgőzt képes befogadni, a több vizgőz több hősést eredményez. Az évente jelentkező csekély hőtöbblet évtizedek múltával megnöveli a hó- és jégtakaró tömegét. A megnövekedett tömeg egyre nagyobb súllyal préseli a jégtakarót a tengerpart felé, egyre több és nagyobb jéghegy válik le és úszik el a partoktól (jéghegyborjázás). A növekvő tömegű jéghegyek olvadása egyre jobban hűti a környező tengerek vizét. A lehűlő tenger hűti a levegőt, mérsékli vagy leállítja a melegedést (25. ábra). Ez a negatív visszacsatolás végül is stabilizálja a sarki jégtakarót.

A kevésbé hideg éghajlaton található hegyi gleccserek gyorsabban reagálnak a légkör melegedésére, a bennük felhalmozott jég térfogata azonban globális mércével mérve nem jelentős. A gleccserek olvadásának megindulásához elegendő néhány évtizedes melegedés, amint ezt az elmúlt száz év tapasztalata is mutatta. Becslések szerint 1900–1961 között a gleccserek visszahúzódásából származó olvadékvíz a tenger szintjében 2,8 cm emelkedést okozott. Az Alpok gleccserei hosszának változásait évszázadokra visszamenően sikerült adatokkal nyomon követni. A kis jégkorszak idején hosszuk megnőtt, a múlt század második felében, a kis jégkorszak befejeződésével, a gleccserek kezdtek visszahúzódni. Nyilván rájuk nem vonatkozik a fent vázolt negatív visszacsatolás.



25. ábra. Negatív visszacsatolás az Antarktison

Elméleti számításokat végeztek arra vonatkozóan, hogy globális melegedés esetén mi történik Grönland és az Antarktisz jégtömegével. Azt találták, hogy jelentős változás Grönland jégtakarójában ezer vagy tízezer év elteltével következhet csak be, az Antarktison tízezer évek kellenek a jégtakaró jelentős megváltozásához. A 26. ábra jól illusztrálja a hó és jég évi felhalmozódásának illetve fogyásának függését a hőmérséklettől. Amikor az évi középhőmérséklet megközelíti a fagypontot (negatív irányból), a nyarak elég melegek ahhoz, hogy az olvadás és elpárolgás túllépje az évi felhalmozódás mértékét, megkezdődik a jégtömeg fogyása. A már említett adatokat idézve az évi középhőmérséklet az Antarktison -11 és -55 , Grönlandon -4 és -29 °C között változik.



26. ábra. A hó- és jégtakaró felhalmozódásának és elfogyásának függése az évi átlaghőmérséklettől (felső rész). A jég évi vastagságának függése a hőmérséklet-változástól (alsó rész). Az Antarktisz alacsony hőmérsékletével az *a* szakaszhoz tartozik, a legtöbb hegyi gleccser a *b* szakaszhoz

Különböző szerzők Grönland jégta­karójának tömegháztartására a következő ada­tokat szolgáltatták 10^{12} kg/év egységekben:

felhalmozódás	abláció (olvadás, elfolyás)	borjázás	nettó változás
+500, +630	-170, -330	-210, -280	0, +270

A számítások többsége csekély nettó növekedést mutat Grönland jégtömegében. Az Antarktiszra végzett hasonló számítások még inkább bizonytalanok, az évi nettó tömegváltozás a becslések szerint $+400 \cdot 10^{12}$ kg és $-400 \cdot 10^{12}$ kg közöttinek adódott.

Mindenesetre az utolsó 30 évben tapasztalt csaknem $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os melegedés során az Antarktiszon a hófelhalmozódás 25%-kal növekedett. Az Antarktisz vízháztar­tasának egyenlegéből általában inkább a jég halmozódására, és ennek következ­tében a tengerszint süllyedésére következtetnek. A különböző becslések adatait a VIII. táblázat foglalja össze.

VIII. táblázat
A közreműködő tényezők hatása a tengerszint emelkedésében (cm)
1985–2030 között (változatlan emberi tevékenység mellett)

	Hőtágulás	Hegyi gleccserek	Grönland	Antarktisz	Összes
Felső határ	14,9	10,3	3,7	0,0	28,9
Legjobb becslés	10,1	7,0	1,8	-0,6	18,2
Alsó határ	6,8	2,3	0,5	-0,8	8,7

8.4. BIZONYOSSÁGOK ÉS BIZONYTALANSÁGOK

Az 1. fejezet elején ígéretet tettem, hogy „amennyire ez egyáltalán lehetséges, szét akarom választani a reális veszélyeket a képzelet szülte rettegéstől. Célom annak lelkiismeretes tisztázása, hogy melyek azok a reális veszélyek, amelyek ellen semmit sem tehetünk, és melyek azok, amelyek ellen tudunk és kell is védekeznünk.” A képzelet szülte félelmek többnyire a bizonytalanságból fakadnak. Több-kevesebb bizonytalanság kísér mindenfajta légköri előrejelzést akár egy-két napra, akár hosszabb időre érvényes. Ezt a bizonytalanságot használják ki egyesek félélves vagy

egész éves, napi bontású „prognózisok” terjesztésével. Hogy ezek a grafikus „előrejelzések” milyen mértékben csökkentik az éghajlati ismereteinkhez képest a bizonytalanságot, arról a „feltalálók” nagyvonalúan hallgatnak. Ami ugyanis ezekben a „jóslásokban” reálisnak bizonyul, az a már meglévő éghajlati ismereteink szerint is várható. Például hazánkban a hőmérséklet januárban -1 , júliusban $+22$ °C körül ingadozik; a legtöbb zivatar a májustól augusztusig terjedő időben fordul elő; a téli hónapokban többnyire hó vagy havas eső esik stb. Az sem meglepő, hogy az úgynevezett „bécsi előrejelzés” a német Nordstern Biztosító Társaság megrendelésére készül, és reklámcélokat szolgál. A jövő időjárása bizonytalan, tehát kössünk biztosítást az időjárási károkra.

Nem kevesebb bizonytalanság takarja éghajlatunk jövőjét a következő évtizedekben vagy a legközelebbi évszázadban. Ha természeti környezetünknek, a légkör összetételének és az éghajlatnak kedvezőtlen megváltoztatásában közreműködünk, akkor ezért felelősek vagyunk az utánunk következő generációk előtt. A bizonytalanság itt is alkalmat ad fenyegető jóslásokra, rettegek terjesztésére.

Minthogy a Föld-légkör rendszer magában foglalja a légkört, a litoszférát, a hidroszférát, a krioszférát és a bioszférát, a rendszer működését a meteorológián kívül egy egész sor tudományág közreműködésével lehet csak tanulmányozni. A bizonyosságok és bizonytalanságok alább következő felsorolása ezért nem lehet teljes. Teljesebbé tételéhez geológusokra, talajtanosokra, hidrológusokra, oceanográfusokra, glaciológusokra, biológusokra, vegyészekre, fizikusokra, csillagászokra lenne szükség. Ha a felsorolásra csupán meteorológus vállalkozik, akkor értékelése tükrözni fogja a meteorológia sajátos szemléletét, és hiányozni fog belőle a többi érintett tudományágtól várható elemzés.

A légkör és az éghajlat alakulását érintő kérdéseket kétféleképpen csoportosíthatjuk: bizonyosságuk szerint és az embertől való függőségük alapján. Az előbbi csoportosításban bizonyosságok és bizonytalanságok különböztethetők meg, az utóbbi csoportosításban aszerint teszünk különbséget, hogy az emberi beavatkozással semmit sem tehetünk-e, vagy tudunk és kötelességünk is tenni valamit.

Bizonyosságok

1. A Nap tüzelőanyaga a hidrogén-hélium fúzió révén évmilliárdokra biztosított. Belátható ideig nem kell tartanunk a Nap kihűlésétől és a Föld teljes megfagyásától.

Bizonytalanságok

1. A napállandó (a Nap fényereje) belső fizikai folyamatok során évszázados vagy annál hosszabb időléptékben megváltozhat. Ténylegesen változik-e és milyen mértékben? Hogyan reagálna és miként kompenzálna az esetleges változást a Föld-légkör rendszer?

2. Az ember által előállított energiák eltörpülnek a Földre érkező szoláris energia mellett. A földfelszínre jutó sugárzási energia 16 ezer-szer nagyobb, mint a világ jelenlegi energiafogyasztása.
3. A világ népességének gyarapodása miatt jelentősen növelni kell az élelmiszer-termelést.
4. Az életszínvonal növelése miatt növekszik az egy főre jutó energiafelhasználás, amelynek mértéke már most is példa nélküli a történelemben.
5. Az igen összetett Föld-légkör rendszer működésének alapos megismerése az egész világra kiterjedő nemzetközi összefogást igényel.
6. A légköri gázok üvegházhatása mintegy 30–32 fokkal megemeli a globális átlaghőmérsékletet a légkör nélküli Föld egyensúlyi hőmérsékletéhez képest.
7. A földi légkör kémiai összetétele lényegesen különbözik a többi bolygó légkörétől és a geokémiai egyensúlytól.
8. A Földön az élet megjelenése óta nem volt olyan katasztrófa, amely a bioszféra teljes pusztulását okozta volna.
9. Nagyvárosokban és nagyobb iparvidékeken az egészségre káros légszennyeződés van.
10. A savas esők egyre több kárt okoznak műemlékek rongálódásában, fák megbetegedésében, a korrózió elősegítésében.
11. A Déli-pólus felett a sztratoszférában az 1980-as években, tavasszal, mintegy felére csökkent az ózontartalom.
2. Az emberi tevékenység okozta levegőszennyezés megváltoztatja az üvegházhatást (melegedés), továbbá a légkör átlátszóságát (lehűlés). A két ellentétes hatás miként kompenzálja egymást?
3. Hány embert tud eltartani a Föld? 30 milliárdot? Jók-e a becslések, amelyek szerint a 21. században 10 milliárd lélekszámnál megáll a gyarapodás?
4. Milyen energiapolitikát kell követni? Takarékosabb technológiát? Vagy sikerül-e környezetkímélő energiaforrásokkal helyettesíteni a fosszilis tüzelőanyagokat?
5. Milyen szerepe van az óceánoknak és az élővilágnak az éghajlat alakításában? Elegendő ismeret birtokában vagyunk-e a kérdés eldöntéséhez?
6. Az emberi tevékenység által a légkörbe juttatott gázok milyen mértékű melegedést okoznak? Hogyan hatnak ezek a hatások a regionális éghajlatra?
7. Mennyire volt aktív szerepe az élővilágnak a légkör összetételének és az éghajlatnak a kialakításában?
8. Létezik-e tényleg a Gaia, és belső szabályozó rendszereivel (homeosztázis) képes-e elhárítani az élővilág teljes pusztulását a Földön?
9. Sikerül-e nemzetközi egyezmények betartásával redukálni a káros szennyeződést?
10. Ugyanaz, mint a 10.
11. Az ózoncsökkenés tisztán az emberi tevékenység következménye-e (freon, N_2O) vagy természetes okok is közrejátszhatnak?

12. A technikai civilizáció a termékek bőségével növeli az általános élet-színvonalat.
13. A globális átlaghőmérséklet a múlt század végétől lassú emelkedést mutat.
14. Az évente lehullott csapadék mennyisége lokálisan erősen változik a Föld különböző részein.
15. Az Antarktisz és Grönland jégtakarójának tömege az utolsó 100 év alatt nem változott.
16. Az óceánok nagy hőtehetlenségük miatt fékezik a légkör melegedését, késleltetik az éghajlat változását.
17. A felhőzet jelentősen növeli a Föld planetáris albedóját.
12. A trópusi erdők irtása, a hulladékok halmozódása, az ökológiai egyensúly felborítása nem követel-e túl nagy árat?
13. A globális melegedés az éghajlat természetes változékonyságára vagy az emberi tevékenységre vezethető-e vissza?
14. A csapadék globális mennyisége változik-e évről évre, évtizedről évtizedre? Az adatok elégtelensége miatt nem tudjuk.
15. Néhány fokos fölmelegedés esetén növekszik-e a sarki jégtömeg és csökken-e a tengerszint magassága, vagy növekszik a gleccserek olvadása a hő okozta tágulás következtében.
16. A felszíni tengeráramokat kiegyenlítő mélytengeri áramlások milyen kényszerfeltételek mellett stabilizálódnak.
17. Egy esetleges fölmelegedés milyen mértékben növeli a felhőzetet és ezzel a Föld albedóját?

Az éghajlat alakulását befolyásoló események egy része független az emberi tevékenységtől, másik részéért felelősek vagyunk. Válasszuk tehát szét a felsorolt 17 tényezőt aszerint, hogy nem tehetünk, vagy tehetünk-e valamit ezek befolyásolása érdekében.

Semmit sem tehetünk: 1. A Nap fényerejének stabilizálása érdekében. 7. és 8. Az élővilág és a légkör között évmilliárdok során kialakult belső szabályozó rendszerek megváltoztatása érdekében. 14. A csapadék szeszélyes időbeli és térbeli eloszlásának egyenletessé tétele érdekében. 15. A Déli- és Északi-sarkvidék jégtakarójának stabilizálása érdekében. 16. Közvetlenül nem tudjuk befolyásolni a tengeráramlások rendszerét. 17. Ugyanígy nem tudjuk befolyásolni a felhőzet globális mennyiségét és vastagságát, ami a Föld albedójának fontos tényezője.

Tudunk és kell változtatnunk: 2., 4. és 6. A közlekedés, ipari termelés, háztartási energiafelhasználás terén energiatakarékossággal, környezetkímélő technológiával, új erőforrások alkalmazásával csökkenteni kell a levegőszennyezést. 3. A művelésre alkalmas területek kihasználásával, a mezőgazdaság gépesítésével, megfelelő kultúr-növények elterjesztésével, vetőmag nemesítéssel, permetező öntözéssel a világ élelmiszertermelése többszörösére emelhető. 9. és 10. A levegő és az éghajlat megőrzésére hozott nemzetközi egyezmények betartásával a káros anyagok légkörbe bocsátásának rátája a 21. századra csökkenthető. Ez a mai generáció legsürgősebb

feladata. 11. A freongázok gyártását és forgalmazását a legtöbb országban már korlátozták vagy betiltották. A fejlődő országokban még nem veszik komolyan a veszélyt. 12. A trópusi erdők irtása minél előbb megszüntetendő, ellenkező esetben a jövő évszázad közepére ezen erdők teljesen kipusztulnak. A hulladékok hasznosítása vagy környezetkímélő tárolása elengedhetetlen feladat. 13. Az emberi tevékenységnek az üvegházgázok kibocsátásán keresztül az éghajlat megváltozására gyakorolt befolyása ma még vitatott, de a légkör nem lehet kísérleti eszköz. A fő kérdés itt az, hogy a veszély (fölmelegedés) mértéke arányban áll-e azzal a költséggel, amit az ipari technológiák átalakítása igényelne a fejlett ipari országokban.

Összegezve: Az ember különleges képességeinek birtokában jogot szerzett arra, hogy fokozatosan meghódítsa a Földet, szolgálatába állítsa a természet erőit. „Legyetek termékenyek, szaporodjatok, töltsetek be a földet és vonjátok uralmatok alá.” (Gen. 1,28). Ennél tömörebben még senki sem foglalta szavakba az emberiség történetét. Ugyanakkor képességeinek birtokában az ember felelősséggel tartozik a rábízott javakért, kötelessége azokat megóvni a pusztulástól. Lehet és kell óvnunk környezetünk tisztaságát, amint erre szép példákat találunk egyes civilizált országokban: Svájc, Ausztria, Németország nyugati része, Anglia és még számos ország. A Föld története bizonyítja, hogy az élővilág képes alkalmazkodni és túlélni változásokat, miközben egyes élőlények kihalnak, de más fajok lépnek helyükbe, amelyek biztosítják az élet folyamatosságát a Földön. Ez a tapasztalat reményt ad arra, hogy az emberiség is képes lesz alkalmazkodni a változásokhoz, amelyeket esetleg maga idéz elő. Föltéve, ha kellő önmérséklettel csökkenteni fogja a maga okozta veszélyeket.

Lakható marad-e a Föld? – kérdezzük aggodalmaskodva. Amikor kisgyermek születik, odajönnek megnézni a családtagok, rokonok, ismerősök. Az újszülött sírni kezd, mert megijed a sok mozgó „valamitől”, ami körülveszi. Azután meglátja édesanyját, aki rámosolyog, karjába veszi, és a kisgyermek megnyugszik, elhallgat. Honnan tudja, hogy éppen édesanyja az, akitől nem kell félnie? Ez az *ősbizalom*, ami vele születik az emberrel. Ezt az ősbizalmat nemcsak a gyermek veszíti el fokozatosan csalódásai révén, hanem az emberek tömegei is, amikor a természet fölötti hatalmukat rosszul használják. Amikor megfélelkeznek arról, hogy a természetben semmi sincs önmagáért, hanem minden valami másra irányul, és minden valami másra van utalva (teleológia, 7.2. fejezet). Nem véletlen, hogy lakhatóvá vált a Föld, és az élet megjelenése óta megmaradt rajta az élővilág. Ha kizárjuk a nagyon ritka kozmikus katasztrófa lehetőségét az elkövetkező néhány ezer évben, akkor a Földet csak az ember teheti saját maga számára lakhatatlanná.

Végül idézzük Marx Györgynek, a Kossuth-díjas fizikusnak egy gondolatát. „Amikor földön kívüli civilizációkat keresünk a világmindenségben, két lehetőséggel számolunk. Ha találunk valahol egy távoli bolygón magasabb rendű életet, akkor van reményünk arra, hogy a technikai civilizáció nem pusztítja el önmagát, hiszen erre példát találtunk. Vagy sehol sem találunk értelmes lényeket a kozmoszban, ekkor annál inkább vigyáznunk kell, hogy azt az egyetlenegy civilizációt itt a Földön el ne pusztítsuk.”

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Hálás köszönettel tartozom dr. Major Györgynek, az MTA X. Osztálya Meteorológiai Szakbizottsága elnökének, aki a könyv megírására ösztönzött, továbbá dr. Antus Sándornénak, az Akadémiai Kiadó és Nyomda főszerkesztőjének a technikai részletek tisztázásában nyújtott értékes segítségéért. Köszönetemet fejezem ki dr. Christian Schönwiese professzornak, a J. W. Goethe Egyetem (Frankfurt am Main), dr. Wilfrid Bach professzornak a Münsteri Egyetem tanárának a rendelkezésemre bocsátott információkért és adatokért, dr. Bérczi Szaniszlónak a frissen megjelent könyvében található adatoknak könyvemben történő felhasználásáért. Köszönettel tartozom dr. Kiss Árpád adjunktusnak a kézirat szerkesztésében és a szövegnek számítógépes tárolásában, Nagy Istvánné Sipos Máriának a rajzok gondos elkészítésében végzett lelkiismeretes munkájáért. Köszönetet mondok dr. Major Györgynek és dr. Tanczer Tibornak a meteorológiai műhold képekért, amelyeket könyvemben felhasználtam.

- AMBROZY P. – CZELNAI R. – GÖTZ G. (1977): Éghajlatingadozások és az éghajlati rendszer modellezése. *Fizikai Szemle*, 27. 2. sz. 1–9. o.
- BAADE, FR. (1965): *Versenyfutás a 2000. évig*. Közgazdasági és Jogi Könyvkiadó. 260 o.
- BAADE, FR. (1969): *Legyen mindenki jóllakott*. Közgazdasági és Jogi Könyvkiadó. 274 o.
- BACH, W. – JAIN, K. (1991): *From Climate Crisis to Climate Protection*. Greenpeace Germany, Muenster Univ., p. 74.
- BALÓ GY. – LIPOVE CZ I. (1989): *Tények könyve '90*. Ráció Kft.
- BAUR, F. – LINKE, F. (eds) (1962): *Meteorologisches Taschenbuch*, I. Band. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 806 pp.
- BENCZE P. (1991): Az ózon koncentrációjának alakulása a középső légkörben. *Időjárás*, 95. 2–3. 77–93. o.
- BENCZE P. – MAJOR GY. – MÉSZÁROS E. (1982): *Fizikai meteorológia*. Akadémiai Kiadó. 300 o.
- BÉRCES T. – TURÁNYI T. (1991): Ózon képződése és eloszlása nagy szennyezőforrások környezetében. *Időjárás*, 95. 2–3.
- BÉRCZI SZ. (1991): *Kristályoktól bolygótestekig*. Akadémiai Kiadó, 200 o.
- BORBÉLY E. (1976): A légkör ózontartalmának és a sztratoszféra hőmérsékletének változásai. *Időjárás*, 80. 6. 332–336. o.
- BUDYKO, M. J. (1982): *The Earth's Climate: Past and Future*. Academic Press. London, 308 pp.
- Climate Monitor* (1977) Climatic Research Unit, Norwich.
- DOBOSI Z. (1973): A sugárzási egyenleg területi eloszlása Magyarországon. Akadémiai doktori értekezés, 138. o.
- EDDY, J. A. (1977): The Case of Missing Sunspots. *Scientific American*, 236, pp. 80–92.
- FLEISCHER T. (1990): Energiarendszerek, gazdaság, környezet, társadalom. *Tudomány*, 6. évf. 11. sz. 70–73 o.
- GALAMBOS T. (1975): *Ember a világűrben*. Kossuth Könyvkiadó, 272 o.
- Glaciers, Ice Sheets and Sea Level: Effect of CO₂ Induced Climatic Change* (1985) Washington, D. C. 363 pp.
- GLAGOLJEV, JU. A. (1970): *Spravocnik po fiziceskim parametram atmosfery*. Gidrometizdat, 212 pp.
- GÖTZ G. (1977): A globális légkörkutató program. Meteorológiai tanulmányok, 17. sz. OMSZ, 91 o.
- GÖTZ G. (1978): Az első globális GARP kísérlet. FGGE. Meteorológiai Tanulmányok, 30. sz. OMSZ, 161 o.
- GÖTZ G. (1990): Az üvegházhatás évszázada. *Tudomány*, 6. évf. 9. sz. 16–22. o.

- GRISWOLD, W. J. (1979): Climatic Variation and the Social Revolution of 17th Century Anatolia. International Conference on Climate and History, 8–14 July, 1979. Norwich. Abstracts, p. 73.
- HOFF, B. (1982): *Micimackó és a Tao*. Kentaur Könyvek, 154 o.
- JONES, PH. D. – WIGLEY, M. L. (1990): Egyre melegszik a Föld. *Tudomány*, 6. évf. 10. sz. 70–77. o.
- KARLSTROM, TH. N. V. (1979): Paleoclimate and Mediterranean. History. International Conference on Climate and History, 1979. Norwich, Abstracts, p. 82.
- KNITTEL, J. (1976): Ein Beitrag zur Klimatologie der Stratosphäre der Südhalbkugel. *Meteor. Abhandlungen*, Serie A. Bd. 2.
- KOPPÁNY GY. (1975): Estimation of the Life Span Atmospheric Motion Systems by Means of Atmospheric Energetics. *Meteorological Magazine*, Vol. 104. pp. 302–306.
- KOPPÁNY GY. (1978): A meteorológiai információk mennyisége és hasznosításuk néhány kérdése. OMSZ. Hiv. Kiadv. 48. k. 17–23. o.
- KOPPÁNY GY. (1981a): Az éghajlatingadozások kutatásának eszközei, együttműködés különböző tudományágakkal. *MTA X. Oszt. Közleményei* 14/2, 193–207. o.
- KOPPÁNY GY. (1981b): Some Aspects of the Predictability of Weather. Proceedings of the Symposium on Current Problems of Weather-prediction. Vienna, VI. 23–26. 1981. pp. 56–60.
- KOPPÁNY GY. (1983): Az időjárás hosszabbtartamú előrejelezhetősége. Akadémiai doktori disszertáció.
- KOPPÁNY GY. (1986): Az időjárás hosszabbtartamú előrejelzése. Tankönyvkiadó, Budapest, 150 o.
- KOPPÁNY GY. (1989a): *Légköri erőforrások*. JATE Kiadó, 103 o.
- KOPPÁNY GY. (1989b): A sztratoszféra cirkulációjának tavaszi átfordulása az északi hemiszférán. *Időjárás*, 93. 6. 340–350. o.
- KOPPÁNY GY. (1991): A meridionális szélkomponens ingadozása az alsó sztratoszférában. *Időjárás*, 95. 2–3. 94–100. o.
- KORDOS L. (1979): A magyarországi paleoklimatológiai kutatások módszerei és eredményei. OMSZ. Hiv. Kiadv. L. kötet, 167 o.
- LAMB, H. H. (1976): *Understanding Climatic Change*. University of East Anglia, Norwich.
- LAMB, H. H. (1988): *Weather, Climate and Human Affairs*. Rutledge, London, pp. 364.
- LANDSBERG, H. E. – PERRY, A. H. (1981): Energiaszükséglet (orosz nyelven). *Energija i klimat*. Leningrad, pp. 47–53.
- LEPP I. (1981): Éghajlati Világprogram. *Légkör*, 26. évf. 1. sz. 4–6. o.
- LÉVAI A. (1986): Kiegészítő energiaforrások. Napenergia-hasznosítás. *Magyar Tudomány*, 43. k. 1. sz. 1–15. o.
- LOCKWOOD, J. G. (1986): *World Climatic Systems*. Edward Arnold Ltd, London, 302 pp.
- LOKSA G. (1991): A légoszlop teljes ózontartalmának időbeli változása Magyarországon. *Időjárás*, 95. 2–3. sz. 106–109. o.
- LOVELOCK, J. E. (1991): *Gaia*. Göncöl zsebkönyvek. 1. 204 o.
- LOVELOCK, J. E. – MARGULIS, L. (1973): Atmospheric Homeostasis by and for the Biosphere: the Gaia Hypothesis. *Tellus*, 26, pp. 2–10.
- MADÁCH I. (1960): *Az ember tragédiája*. Magyar Helikon, 172. o.
- MARX GY. (1978): *Éltrevaló atomok*. Akadémiai Kiadó, 320 o.
- MCGEE, R. (1979): Archeological Evidence for Climatic Change during the Past 5000 Years. International Conference on Climate and History, Norwich, Abstracts, p. 73.

- McGOVERN, T. M. (1979): The Economics of Extinction in Norse, Greenland. International Conference on Climate and History, Norwich, Abstracts, p. 39.
- MÉSZÁROS E. (1977): *A levegőkémia alapjai*. Akadémiai Kiadó, 180 o.
- MÉSZÁROS E. (1991): A légköri ózon kutatásának története és jelentősége. *Időjárás*, 95. 2–3. 69–76. o.
- MÉSZÁROS E. – PÁLÖLGYI T. (1990): Légkör hatása a Százszorszép bolygóra. *Időjárás*, 94. 4. 339. o.
- MORETTI, P. M. – DIVONA, L. V. (1986): Modern szélmalmok. *Tudomány*, 2. évf. 8. sz. 90–97. o.
- PÉCZELY GY. (1984): *A Föld éghajlata*. Tankönyvkiadó, 598 o.
- PISTER, CH. (1988): *Klimageschichte der Schweiz 1525–1860*. Verlag Paul Haupt, Bern, 348 pp.
- PIVOVAROVA, L. J. (1970): Study of the Regime of Atmospheric Transparency. WMO TN, 104. pp. 181–185.
- PROBÁLD F. (1974): *Budapest városklímája*. Akadémiai Kiadó, 126 o.
- REDDY, A. K. N. – GOLDEMBER, J. (1990): A fejlődő országok energiaellátása. *Tudomány*, 6. évf. 11. sz. 70–73. o.
- RAMBLER, M. B. – MARGULIS, L. – FESTER, R. (eds) (1989): *Global Ecology; Towards a Science of Biosphere*. Academic Press, Boston, New York, London, 204 pp.
- RÉTHLY A. (1962): *Időjárási események és elemi csapások Magyarországon 1700-ig*. Akadémiai Kiadó.
- RÉTHLY A. (1974): *Időjárási események és elemi csapások Magyarországon 1701-től 1800-ig*. Akadémiai Kiadó.
- REX, D. F. (1969): *Climate of the Free Atmosphere. World Survey of Climatology*. Vol. 4. Elsevier, Amsterdam.
- SABADY, P. R. (1980): *A napenergia építészeti hasznosítása*. Műszaki Könyvkiadó.
- SCHNEIDER, S. H. (1989): A változó éghajlat. *Tudomány*, 5. évf. 11. sz. 26–35. o.
- SCHÖNWIESE, CH. D. (1988): Volcanic Activity Parameters and Volcanism–Climate Relationships within the Recent Centuries. *Atmosfera*, 1. pp. 141–156.
- SCHWERDTFEGGER, W. (1984): *Weather and Climate of the Antarctic*. Elsevier, Amsterdam, 262 o.
- Scientific Assessment of Climate Change* (1990) WMO, UNEP. Geneva.
- SORENSEN, TH. C. (1965): *Kennedy*. Bantam Books, pp. 880.
- STOLARSKI, S. R. (1988): Ózonlyuk az Antarktisz felett. *Tudomány*, 6. évf. 3. sz. 10–16. o.
- SZÉKY P. (1979): *Ökológia*. Natura, 174 o.
- SZENT-GYÖRGYI A. (1973): *Az élet jellege*. Gyorsuló idő. Magvető Kiadó, 116 o.
- TÁNCZER T. (1988): *Műholdmeteorológia*. Akadémiai Kiadó, 172 o.
- The Global Climate System* (1987) WMO, Geneva.
- VON DER HAAR T. H. et al. (1980): Measurements of the Earth Radiation Budget from Satellites during the First GARP Global Experiment. COSPAR, Budapest.

TÁRGYMUTATÓ

- aeroszol 28, 48, 49, 50, 51, 62, 94
- albedó 44, 45, 46, 47, 53, 92, 93, 94, 95, 101, 105, 112
- atomcsend egyezmény 10, 11
- Bécsi Alapegyezmény 73
- bizonyosság 109, 110
- bizonytalanság 14, 34, 70, 73, 97, 98, 99, 106, 109, 110
- bolygók együttállása 9
- bruttó nemzeti termék (BNT), egy főre jutó 21, 22
- Dobson-egység 64, 66
- Éghajlati Világprogram 41
- Egyiptom sötét korszaka 16
- éhínség 9, 16, 17, 18, 24, 57, 69
- elektromágneses sugárzás 48, 49
- Élelmezési Világkonferencia 24, 29, 40
- élelmiszer-termelés 15, 25, 100, 101, 111
- előrejelzés 25, 27, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 40, 42, 96
- energia koncentráció 11, 22
- energiafogyasztás
 - , egy főre jutó 19, 21, 23
 - , globális 20, 111
- ENSZ 15, 24, 25, 29, 30, 41, 73
- entrópia 85, 87,
 - , Shannon-féle 98
- FAO 15, 24, 29, 41
- Föld-légkör (éghajlati) rendszer 43, 44, 93, 97, 100, 105, 110, 111
- fotoszintézis 55, 56, 86, 95
- freon lásd halogénezett szénhidrogén
- „független kultúra”
 - , első 16
 - , második 17
- gabonaexport, -import 23
- Gaia-hipotézis 85, 88, 90, 95
- GARP (Global Atmospheric Research Programme) (Globális Légkörkutató Program) 32, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 62, 76, 78, 101, 105
- GDPS (Global Data Processing System) (Globális Adatfeldolgozó Rendszer) 31, 33
- Genfi Konvenció 72, 73
- GOS (Global Observing System) (Globális Megfigyelő Rendszer) 31
- GTS (Global Telecommunication System) (Globális Távközlési Rendszer) 31
- H-bomba robbanása 11, 12
- Hágai Nyilatkozat 74
- Halley üstökös 8, 9
- halogénezett szénhidrogén (freon) 50, 51, 59, 63, 70, 73, 74, 111, 113
- „hellén világ sötét korszaka” 16
- Helsinki Jegyzőkönyv 72
- heteroszféra 48
- homeosztázis 89, 91, 94, 111
- homoszféra 48
- Időjárás Világszolgálat (WWW – World Weather Watch) 29, 31, 35
- infravörös vagy hősugárzás 27, 49, 50, 79, 80, 82
- inverzió 54
- járványok 9, 14, 16
- kén-dioxid 53, 57, 59, 72
- „kis jégkorszak” 17, 101, 107
- klímaváltozások 74, 103
- „középkori optimum klíma” 17
- légkör gázösszetevői 50, 52, 69
- másodfajú prognózis 70
- másodlagos légkör 53

- metán (CH₄) 50, 53, 56, 59, 69, 70, 89
 meteorológiai mérések 26, 27, 28, 30, 31, 33, 36, 37, 39, 44, 59, 62, 65, 80, 96, 103
 Meteorológiai Világszervezet (WMO – World Meteorological Organization) 24, 25, 29, 30, 31, 34, 35, 40, 41, 62
 „mexikói csodabúza” 24
 Montreáli Jegyzőkönyv 73, 74
 műholdak
 –, geostacionárius 30, 31, 32, 37, 40, 76, 78, 79, 80, 81
 –, kvázi-poláris pályán keringő 78
 Nap fűtőanyaga
 Nemzetközi geofizikai év 29
 Nemzetközi Meteorológiai Szervezet (IMO – International Meteorological Organization) 29
 nemzetközi poláris év
 –, Első, Második 28, 29
 népesség duplázódása 14
 népvándorlások 16, 17, 18, 105
 nitrogén 51, 52, 53, 56, 57, 69, 70, 73
 – oxidok 50, 57, 58, 59, 63, 66, 69, 70, 73
 nukleáris háború 10, 76
 ólom 73
 oxigén 7, 8, 46, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 59, 69, 88, 89, 90, 101
 ozmózis 91
 ózon 50, 51, 54, 59, 63, 64, 65, 66, 67, 70, 73, 111
 ökoszisztéma 69, 86, 87
 űsléggkör 53
 PAL (Present Atmospheric Level) (jelenlegi légköri szint) 54, 55
 „proxy” adatok 16, 101
 radioaktív anyagok 10, 12
 Száhel-övezet 18, 24
 sarki jégtakaró 45, 80, 93, 105, 106, 107, 108, 112
 savas esők 57, 58, 59, 67, 72, 111
 Societas Meteorologica Palatina 28
 sókoncentráció 87, 91
 szén-dioxid (CO₂) 46, 48, 50, 52, 53, 54, 55, 56, 59, 62, 69, 70, 74, 89, 90, 94
 szén-monoxid (CO) 50, 59, 66
 szinoptika 28
 Szófia-i Jegyzőkönyv 73
 sztratoszféra 30, 35, 37, 38, 45, 50, 51, 54, 57, 58, 59, 63, 64, 65, 66, 73, 84, 111
 taoizmus 68
 teleológia 87
 „Thule kultúra” 17
 Torontói Konferencia 74
 troposzféra 30, 35, 37, 38, 50, 54, 64, 66, 70
 ultraviola (UV) sugárzás 50, 53
 űrkutatás 25, 29, 52, 75
 üvegházgázok 50, 57, 59, 61, 70, 74, 80, 94, 113
 üvegházhatás 45, 50, 53, 59, 70, 92, 94, 107, 111
 Viking-program 84, 85, 87, 88
 visszacsatolás (feedback) 45, 93, 94, 107, 108
 vízgőz 31, 36, 38, 45, 46, 50, 53, 54, 56, 57, 70, 80, 83, 88, 89, 99, 107
 vízgőz ablak 80
 vulkántevékenység 40, 45, 56, 61, 62, 65, 105
 WMO (World Meteorological Organization) lásd Meteorológiai Világszervezet
 WWW (World Weather Watch) lásd Időjárási Világszolgálat



A kiadásért felelős az Akadémiai Kiadó és Nyomda Vállalat igazgatója

A nyomdai munkálatokat a Typopress Kft. végezte

Felelős vezető: Kovács Gábor

Budapest, 1993

Felelős szerkesztő: Balassa Éva

A fedélterv Ocztos István munkája

Kiadványszám: I/158

Megjelent 10,7 (A/5) ív terjedelemben

Ára: 308,- Ft 10% áfával



