

vezetcsökkentés kiküszöbölne a legfenyegetőbb veszedelemet. Az elkövetkező nemzedékek a jelen nukleáris arzenálokat mindenképpen öngyilkos és haszontalan pénzkidobásnak fogják ítélni.

Ajánlás az európai egyházak számára

A klímatorzulás veszélyével és kockázatával szembeállva, felhívjuk az európai egyházakat és azok vezetőit, hogy vállaljanak irányító szerepet a közgondolkodás elodázhatatlan megfordításában. Kérjük, hogy Európa vegye át a kezdeményezést az energiafogyasztás csökkentésében, valamint a veszélyes nyomgázok kiküszöbölésében nemzeti és egyéni szinten egyaránt.

Első lépésként nyomatékosan kérjük az Európai Püspöki Tanácsot és az Európai Egyházak Konferenciáját, hogy 1990-ben gondosan kísérje figyelemmel azt a genfi konferenciát, amely a Montreáli Szerződés megújításával foglalkozik. Kormányaiknál sürgessék a szén-fluor-klór-vegyületek gyártásának teljes eltiltását Európában. Az egyházak segíthetnek abban, hogy ebből a kérdéses vegyületek egész Földre kiterjedő tilalma bontakozzék ki. A megfelelő póanyagok megválasztásánál a Harmadik Világ országainak gondjaira tisztességesen tekintettel kell lennünk.

Középtávon az egyházaknak szorgalmazniuk kell az energia hatékonyabb felhasználását, kérve az ál-

lampolgárokat, hogy vállalják az ezzel együttjáró kényelmetlenséget, pl. a jelentős energiaadót. Felszólítjuk az egyházakat, hogy hosszú távon fordítsanak figyelmet olyan etikai normák kialakítására, amely egyenlő energiakvótát fogad el a világ minden polgára számára.

Végül kérjük az egyházakat, hogy keressék a nem szokásos megközelítéseket, az alkotó gondolatokat arra vonatkozóan, miként lehetne megállítani a Föld népességének növekedését. Ekkor lehetővé válna a pusztítóan erősödő üvegházhatás visszaszorítása, amely a jövő nemzedékek életét fenyegeti.

A ma létező nukleáris arzenálok által képviselt elképzelhetetlen kockázattal szembenézve az európai egyházak vezetőihez apellálunk, hogy nyomatékosan és fenntartás nélkül szorgalmazzák a nukleáris fegyverkészletek egész világra kiterjedő azonnali gyökeres redukcióját. Nyíltan támogatniuk kell a nukleáris fegyverkísérletek egyetemes betiltását.

A manifesztum ajánlásait elfogadták a meghallgatásban résztvevő *A. Berezin* (Leningrád), *P. Crutzen* (Mainz), *F. Fabian* (München), *K. Heinloth* (Bonn), *S. P. Kapitza* (Moszkva), *R. Kümmel*, (Würzburg), *Marx Gy.* (Budapest), *J. Petrov* (Leningrád), *K. K. Rebane* (Tallin), *C. D. Schönwiese* (Frankfurt), *M. Siegenthaler* (Bern), *K. Shultze* (Aachen), *P. Stichel* (Aachen), *A. Tartaglia* (Turin), *W. C. Turken-Burg* (Utrecht), *Sir F. Warner* (Essex), *R. Zellner* (Göttinga).

A LÉGKÖR ÜVEGHÁZHATÁSA

Marx György

ELTE Atomfizikai Tanszéke

1989. február 26. kora dél. Debrecen peremétől, a Hortobágyon átvonuló Keleti-csatornától már riasztóan látható a közeledő veszély, a száradó dohánylevél színére emlékeztető sárgásbarna porfelhő. Ahogy erre nevezik, a kúnéső. Félelmetes nyári aszályal fenyeget jóelőre olyan kora tavaszon, amidőn alig fedí növényzet a porzó földet, mert a tél sem áztatta meg eléggé a talajt. A kavargó és gyors szél mindent befedő és fullasztó óriásboltozatot épít a lila homokból. Most Tiszafüred és Poroszló felől keletkezhetett. A pusztai reketyések, a messzi fasorok, amik máskor kékellemek, most szürreális agyagfoltokként lebegnek. A hortobágyi keskeny árkok pangó vizeinek fodrán szennyes habok remegnek. A hosszú derekú nádbugák izgatottan vergődnek a szélben, mintha vészharangozni akarnának. Az árokpartok februárvégi csomós fűsarjai szürke-sápadtak lettek a kúnésőtől. Sápkoros odébb a gyenge vetés, a tócsák lepedékesek. Az igyekvő ember szájpaddlását, orrcsatornáit por szárítja és kaparja. Egyébként alig látható mozgó férfi vagy asszony, pláne

gyerek a Hortobágyon, úgyanígy szinte senki Füreden vagy Poroszlón, Dormádon. Félnivaló idő, a kisebb madarak elbújtak, a varjak a földhöz lapultak. Száritott tüskebokrocskákat, ördögszekereket kerget át az úton a vihar, mind keresztbe rohannak. A hortobágyi csárda kútjánál ácsorgó feketebronz kendős hajdú asszonyokról azt gondolni, máris kiapadt tán Debrecen vize. Mintha éppen most járt volna erre Boda Pista idevaló költő, alig reménykedő rimekkel: "Hazám! Életem repedt pereme, végáram, csorba ázsiai táj. A szél kavarta, idehorta."

(Soltész István, Magyar Nemzet.)

Zárt termodinamikai rendszerben véges idő alatt ki egyenlítődnek a nyomás, a kémiai összetétel, a hőmérséklet helyi különbségei. Megszűnik a rendezett, organikus mozgás. Termodinamikai egyensúly áll be, amit Clausius száz esztendeje nevezett el a hőhalál állapotának.

Földünk nyílt rendszer. A 6000 K felszíni hőmér-

sékletű Naptól $I=1,4 \text{ kW/m}^2$ intenzitású sugárzás éri bolygónkat. A Wien-féle eltolódási törvény szerint a T hőmérsékletű sugárzó felület legnagyobb intenzitással olyan λ hullámhosszúságú fényt sugároz, amely fordítva arányos a hőmérséklettel:

$$\lambda T = 0,003 \text{ m K.}$$

(Ez az elemi statisztikus fizikából nyilvánvaló $h\nu \approx kT$ összefüggés pontosított alakja.) A Nap esetében $\lambda = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}$: a napfény látható.

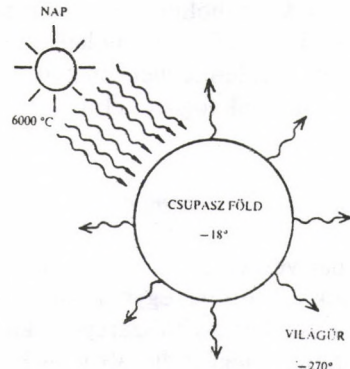
Földünk energiakészlete nem lesz napról napra több. A napfény csak annyira melegíti, hogy végül a Föld ugyanazt a Q energiát sugározza ki, amennyit kap. Lévén a Föld felszíni hőmérséklete kb. 300 K , a Föld sugárzása a $\lambda = 10 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ infravörös hullámhosszon a legerősebb. A földsugárzás fotonjai 20-szorta kisebb energiájúak, mint a napfény fotonjai. A Naptól kapott energiától a Föld úgy szabadul meg, hogy 20-szorta több fotont emittál, mint amennyit elnyelt. Az energiamérleg kiegyensúlyozott, de bolygónk rendetlenséget exportál a 3 K hőmérsékletű világűrbe. A Földön – mint nyílt rendszeren – *átfolyó energia mossa ki a Föld szennyét (entrópiáját)*. Ezt képletesen a következő leegyszerűsített gondolatmenettel szemléltethetjük: Nyílt rendszer entrópiaváltozása a Második Főtétel szerint $\Delta S > \Sigma Q/T$. A Naptól napfény formájában a Föld felvesz Q hőt; T_{Nap} legyen a napfény hőmérséklete (közel a Nap-felszín hőmérséklete). A Föld a világűrnek infravörös kisugárzás formájában lead ugyanekkora Q hőt, a sugárzás $T_{\text{Föld}}$ hőmérséklete megegyezik a Föld hőmérsékletével. Így a Föld entrópiaváltozására a következő becslés adható:

$\Delta S > Q/T_{\text{Nap}} - Q/T_{\text{Föld}} = -Q(1 - T_{\text{Föld}}/T_{\text{Nap}})/T_{\text{Föld}}$, ami negatív lehet. A Föld olyan működő hőgép, amit a 6000 K fokú napkazán fűt és a 3 K hőmérsékletű világűr hűt.

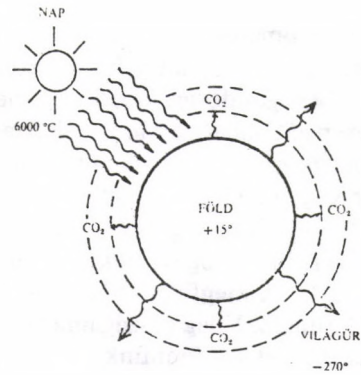
Entrópiacsökkenés állandó hőmérsékleten megteremti az evolúció lehetőségét. Ez a földi biológiai organizáció elindítója és fenntartója. Életünk egy akvárium élővilágára emlékeztet, amely fölött lámpa ég, és amelyben ennek hatására növények nőnek, vízi csigák mászkálnak és aranyhalak úszkálnak. Számoljunk tovább. Földünk sugara $R=6370 \text{ km}$. Átlagos visszaverő képessége (albedója) $a=30\%$, így a napfényből begyűjtött energia $Q=(1-a) \pi R^2 I$ másodpercenként. A $4\pi R^2$ felületű T_0 abszolút hőmérsékletű gömb Stefan és Boltzmann törvénye szerint $Q=4\pi R^2 \sigma T_0^4$ teljesítményt sugároz (1. ábra) ($\sigma=5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$). Állandósult állapotban.

$$(1-a) \pi R^2 I = 4\pi R^2 \sigma T_0^4.$$

Innen $T_0=255 \text{ K} = -18^\circ \text{C}$ adódik. Ekkora volna a meztelen (léggörrel nem borított) Föld átlaghőmérséklete. Vagy ekkora a Holdé.



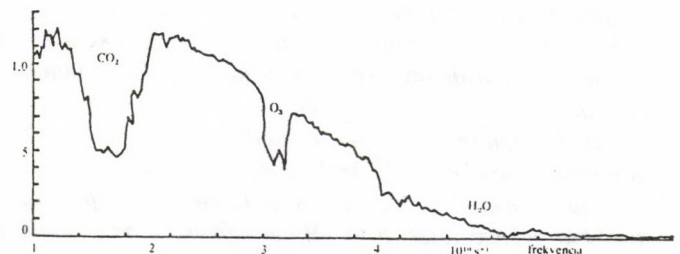
1. ábra Csupas Föld



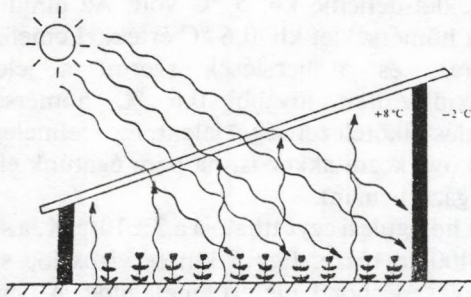
2. ábra Léggöri üvegház

A talaj által kibocsátott infravörös sugárzás szaporasága $\nu=c/\lambda=3 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}$ körüli érték, kb. ekkora a molekulák vegyértékkötéseinek (mint rugóknak) a sajátfrekvenciája. Az elektromágneses hullámban vibráló télerősség berezgeti azokat a molekulákat, amelyeknek ebbe a tartományba esik a sajátfrekvenciája, és amelyekre elektromos télerősség által megfogható elektromos töltések találhatók. A léggöri N_2 és O_2 nempoláros molekulák, a látható és infravörös fény számára egyaránt átlátszóak. A H_2O , CO_2 , O_3 viszont poláros molekulák, töltött végződéseikkel, és megfelelő sajátfrekvenciákkal (3. ábra):

$$\begin{aligned} \text{CO}_2: & \nu = 2 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}, \\ \text{O}_3: & \nu = 3 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}, \\ \text{H}_2\text{O}: & \nu = 4 \cdot 10^{13} \text{ s}^{-1}. \end{aligned}$$



3. ábra A Föld infravörös spektruma



4. ábra Kerti üvegház

Ezért a légköri szén-dioxid, ózon, vízgőz átengedi a látható napfényt, de elnyeli a talaj infravörös sugárzásának jelentős részét. Szerepe ugyanaz, mint a kerteszek üvegházainak. Az üvegtető is átengedi a látható napfényt, de elnyeli a talaj infravörös sugárzását, ezért melegebb értékek felé tolja el az üvegház belső hőmérsékletét (4. ábra). Amikor koratavaszon salátát és paradicsomot fogyasztunk, az üveg szelektív abszorpciójának az előnyeit élvezzük. A bőrünket érő napfényt és a langyos szellőt az atmoszféra szelektív abszorpciójának köszönhetjük.

Leegyszerűsített tárgyalást mutatunk be. Jelölje b a légkör áteresztőképességét az infravörös sugárzás számára. (Ez kb. $b=60\%$.) Az energiamérleg így alakul (2. ábra):

$$(1 - a) \pi R^2 I = 4 \pi R^2 b \sigma T^4,$$

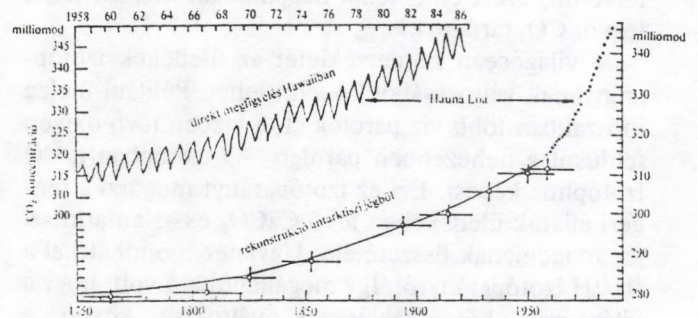
innen $T=288 \text{ K} = +15 \text{ °C}$ adódik a Föld átlaghőmérsékletére. Tengerek és tavak hullámoznak, eső esik, növény zöldell és ember él.

A légköri üvegházhatás szerepét tanúsítja a Vénusszal történő összehasonlítás. A Vénusz $0,72$ -szerte közelebb van a Naphoz, ezért $I/0,72^2 = 2,67 \text{ kW/m}^2$ intenzitású napsugárzás éri. A Vénuszt beborító felhőtakaró viszont a napfény 63% -át visszaveri. Így az elnyelt sugárzás $(1 - 0,63)I/0,72^2$ mennyisége kb. ugyanakkora, mint a Földön. De a

Vénusz légkörének 96% -a szén-dioxid, ezért az infravörös áteresztőképesség mindössze $b=15\%$. Az eredmény $T=460 \text{ °C}$ felszíni hőmérséklet. Testvérbolygónkon nemcsak a higany, hanem az ólom is folyékony volna!

Pontosabb elemzésnél figyelembe kell venni a légkör vagy felhőzet T' hőmérsékletét is. A légkör is hőegyensúlyban van: elnyeli a talaj infravörös sugárzásának b hányadát, másrészt T' hőmérsékleten maga is sugároz mind a talaj, mind a világűr felé. Ez alakítja ki a légkör egyensúlyi hőmérsékletét. (5. ábra).

Az Antarktisz és Grönland jegét megfürve, a különböző mélységből előkerült zárványokat elemezve megállapítható, hogyan alakult a földi légkör szén-dioxid tartalma az elmúlt évezredek és évszázadok során. A legutolsó évtizedek történetét a hawaii Manua Loa vulkánon működő obszervatórium regisztrátumából ismerjük (6. ábra).

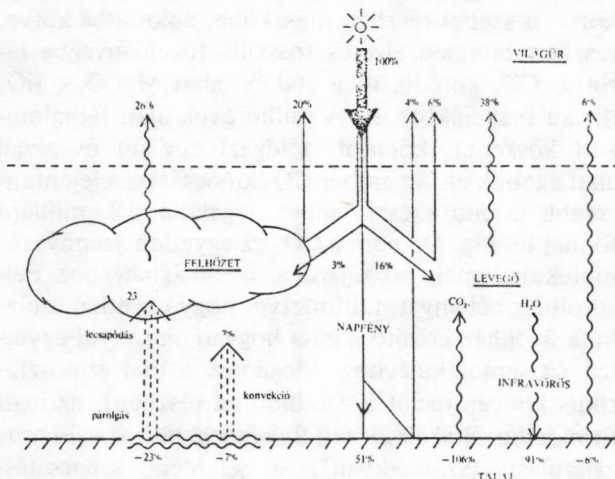


6. ábra A légköri CO_2 -koncentráció növekedése

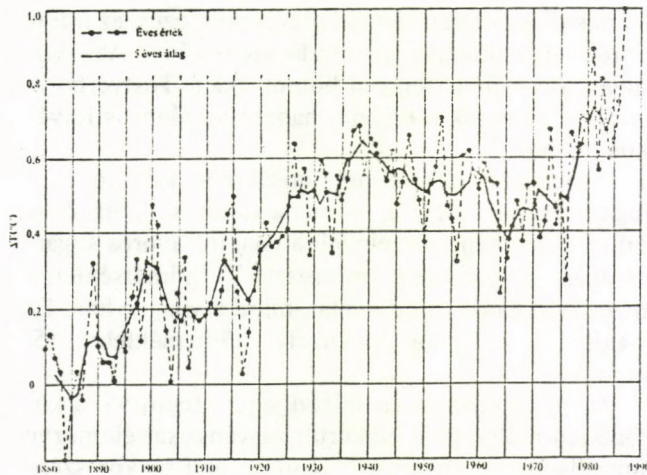
-10 000	190 milliomod
1800	280 milliomod
1958	315 milliomod
1970	323 milliomod
1980	335 milliomod
1989	350 milliomod

A széndioxid-koncentráció a jégkorszakban volt a legalacsonyabb. Az utolsó évszázadban (nyilván az ipari forradalom hatására) folyamatosan növekszik, ez a növekedés az utolsó egy-két évtizedben felgyorsult. A légköri széndioxid-koncentráció jelenleg $1,5$ milliomod résszel növekedik évente.

Az emberiség ma évente mintegy $5-10$ milliárd tonna feketeszénnek megfelelő fosszilis tüzelőanyagot éget el. Ebből kiszámítható, hogy az évi CO_2 kibocsátás mintegy $18-30$ milliárd tonna. Összehasonlítva ezt a légkör CO_2 tartalmának tapasztalt növelésével azt kapjuk, hogy a kibocsátott szén-dioxid fele a légkörben marad, felét elnyeli a világóceán. (A világóceán CO_2 -felvevőképessége hatalmas: a CO_2 a vízben H_2CO_3 formájában oldódik, az élőlények CaCO_3 formájában kagylólélekbe stb. építik be, de az elnyelés üteme korlátozott. A légköri szén-dioxidot a felső vízréteg nyeli el, az telítődik. Ez a vízréteg csak



5. ábra A Nap-talaj-atmoszféra hőháztartás



7. ábra A hőmérséklet emelkedése az ipari forradalom során

lassan keveredik az alsó rétegekkel. Néhány évtizeden belül megugró CO_2 -emissziót az óceán nem tud felvenni, ezért emelkedik napjainkban meredeken a légkör CO_2 tartalma.)

A világóceán hőmérsékletét az üledékek izotóparányának változásából követni lehet. Például meleg időszakban több víz párolog el, a vízben lévő oxigén feldúsul a nehezebben párologó ^{18}O izotópban a ^{16}O izotóphoz képest. Ezt az izotóparányt megőrzi a tengeri állatok üledékében lévő CaCO_3 és az antarktisi jég oxigénjének összetétele. Ugyanez mondható el a $^2\text{H}/^1\text{H}$ izotóparányról. Így megállapítható volt, hogy a világóceán hőmérsékletének változása követi a légkör CO_2 -tartalmának változását, természetesen némi késedelemmel, elsősorban az óceán vízének óriási hőkapacitása miatt (8. ábra). A jégkorszak

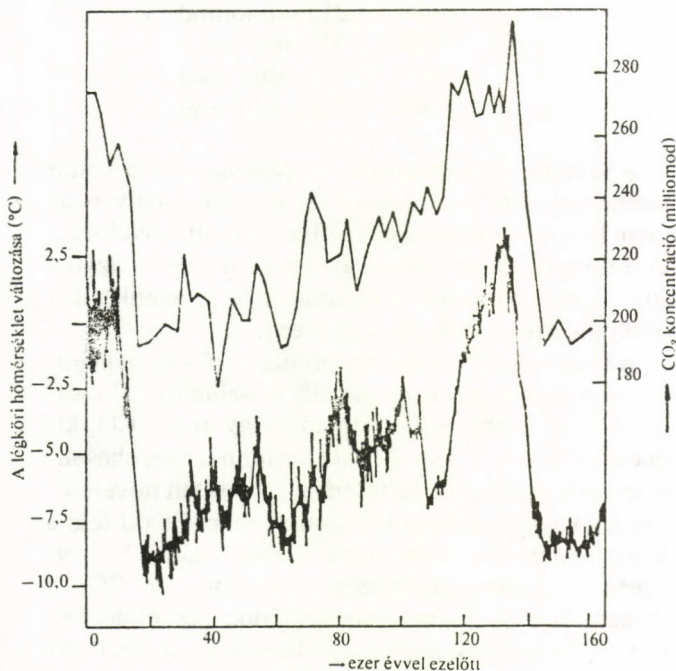
hőmérséklet-deficitje kb. $5\text{ }^\circ\text{C}$ volt. Az elmúlt 130 évben a hőmérséklet kb. $0,6\text{ }^\circ\text{C}$ értékkel emelkedett (7. ábra), és a becslések szerint a jelenlegi széndioxid-szinten további $0,6\text{ }^\circ\text{C}$ hőmérséklet-növekedés-elkötelezettséget jelent. Ez a felmelegedés be fog következni akkor is, ha nem égetünk el több szén, gázt, benzint.

A víz hőtárolási együtthatója a $2 \pm 10^{-4}/\text{K}$, a sziklái ennek 400-ad része. Egy 5 km-es vízoszlop szintje $1\text{ }^\circ\text{C}$ melegedéskor 1 métert emelkedne. A tapasztalat: a jégkor végén Anglia nem volt sziget, Dánia összefüggött Svédországgal. 1800 és 1900 között a tengerszint 14 cm-rel, 1900 és 1950 között 33 cm-rel emelkedett. Szaporodnak a híradások a szél hatására Velencébe behatoló, Banglades rizsföldjeit elárasztó tengeráradásról.

A Föld kőszéntartaléka 5000 milliárd tonna kőszén. Ha ennek még a felét eltüzelnénk (ami fokozódó energiainségünket tekintve nem utópia), és ha a megfelelő CO_2 -kibocsátásnak 30%-át fel is tudná venni az óceán, akkor a légkör CO_2 koncentrációja 1000 milliomod értékre, egy ezrelékre növekedne, ami több fokos hőmérsékletnövekedést, több méteres tengerszint-emelkedést eredményezne. De már az az előre elkötelezett hőmérséklet-emelkedés is, ami benne van az eddig emittált CO_2 -koncentrációban, második özvívvel fenyegeti Hollandiát, Banglades, épp a legtermékenyebb folyódeltákat, egymilliárd ember táplálkozását. Ahogy a globális klímaváltozást tárgyaló torontói világkonferencia jegyzőkönyve (1988) megfogalmazta: "Az emberiség bolygónkkal akaratlanul is egy nem ellenőrzött kísérletet hajt végre, amelynek végső kimenetele egy nukleáris világkonfliktussal összemérhető veszedelemmel fenyeget."

A múltat és a jelen trendet empirikusan ismerjük. Hogy a jövőt előreláthassuk, meg kell értenünk a szóbanforgó folyamatok fizikai-kémiai alapjait. Csak ennek birtokában gondolkozhatunk a jövőbeli cselekvési stratégiánkról.

A Földnek eredetileg a Vénuszhoz és Marshoz hasonló, főleg CO_2 tartalmú atmoszférája volt. Ezt a fotoszintézis egymilliárd év alatt formálta át O_2 -dús légkörré, a szénet részben mészkőbe, dolomitba kötve, részben biomaszába és fosszilis tüzelőanyagba tárolva. CO_2 kötődik meg $300\text{ }^\circ\text{C}$ alatt $\text{MgCO}_3 + \text{SiO}_2$ típusú reakciókban is. A millió évek alatt felhalmozott kőszén, kőolajat, földgázt egy-két évszázad alatt égetjük el. Az ember CO_2 kibocsátása a legintenzívebb szennyezés: évente legalább 18 milliárd tonnát tesz ki. De nem a CO_2 az egyetlen szennyezőmolekula, amely hozzájárul az üvegházhatáshoz. Felsorolunk néhányat, feltüntetve, hogy egyetlen molekula üvegház-erősítő hatása hogyan viszonyul egyetlen CO_2 molekulához. Megadjuk a mai atmoszferikus koncentrációt is (milliomod részben), az ipari forradalom által előidézett üvegházhatáshoz való hozzájárulást (százalékban), a jelenlegi kibocsátást (millió tonnában), az évenkénti koncentrációnövekedést (százalékban), az elmúlt száz esztendő felmele-



8. ábra A légkör CO_2 tartalma és hőmérséklete a múltban antarktisi jégminták szerint

gedéséhez való számított hozzájárulást (fokokban) és a következő 50 év során várható további felmelegedéshez való hozzájárulás becsült értékét (szintén fokokban).

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	O ₃	CF ₂ Cl ₂
Hatékonyság	1	20	150	2000	15 000
Koncentráció	350	1,7	0,31		0,0005
Üvegházhatás	66%	20%	3%	8%	3%
Kibocsátás	18 000	400	28		0,8
Koncentráció-növekedés/év	0,4%	1%	0,25%	1%	5%
Múlt 100 év	0,5 °C	0,1 °C	0,03 °C	0,04 °C	0,07 °C
Jövő 50 év (?)	1,0 °C	0,2 °C	0,13 °C	0,08 °C	0,4 °C

Pár szót kell szólnunk az egyes molekulák szerepéről.

A légköri üvegházhatáshoz legnagyobb hozzájárulása a H₂O molekulának van. A vízgőz koncentrációja a tengerek és szárazföldek párolgásától függ, a mindenkori hőmérséklet függvénye. Az ipari-mezőgazdasági szennyezőmolekulák tehát nem csupán önmaguk infravörös abszorpciója révén idézhetnek elő hőmérséklet-emelkedést, hanem azáltal is, hogy a hőmérsékletet növelve fokozzák a víz párolgását, ez pedig további hőmérséklet-növekedést okoz. Ez teszi a légkör-modellezést nehéz és izgalmas nemlineáris matematikai (számítástechnikai) feladattá.

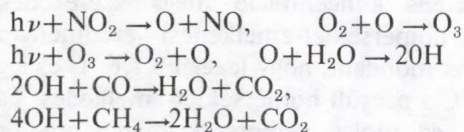
A CO₂-koncentrációt nem csupán a fosszilis fűtőanyagok elégetése fokozza, hanem a biomassza leépülése (talajpusztulás, elsivatagosodás, ami sokban maga is az üvegházhatás erősödésének folyamánya), valamint az erdőirtás (biomassza bomlása, növényi CO₂-megkötőképesség csökkentése). Távlatilag az óceán olajszennyezése által pusztított algapopuláció is káros befolyást gyakorolhat. Becslések szerint a CO₂ éves növekedéséhez egy-két milliárd tonnával hozzájárul az erdők irtása, elsősorban a braziliai trópusi esőerdők vándorló rablógazdálkodással történő felégetése.

A CH₄ az állati gyomorban és mocsárban végbemenő oxigénmentes bomlás termékeként kerül a légkörbe, ott átmenetileg van jelen, mintegy 8 év alatt CO₂-dá és H₂O molekulává oxidálódik. Mégis jelentős szerepe van az üvegházhatás alakításában: a metán hatása ma a szén-dioxidénak harmada-negyede, de kétszer olyan gyorsan szaporodik, elsősorban a mezőgazdaság (tehéntartás és árasztásos rizstermelés) miatt. A rizsföldek metánkibocsátását 120 millió tonnára becsülik évente. A metánkibocsátás növekedésének visszaszorítására mindaddig nem lehet gondolni, amíg a Föld népessége nem stabilizálódik.

Az N₂O forrása a talaj mikrobiológiai tevékenysége (főleg trópusi területen), de hozzájárul a nitrogénműtrágya lebomlása is. A belsőégésű motorok szennyező hatása kisebb.

Az O₃ az alsó légrétegben (troposzférában) az NO₂

bomlásának terméke. Az NO₂ magas hőmérsékleteken, elsősorban a tüzelés, belsőégésű motorok hatására képződik. A napfény felbontja az ózont, így az szabad OH gyököket termel, amelyek viszont a CO és CH₄ oxidálásában hatékonyak.



Ha az ipar és fűtés sok szén-monoxidot termel, ez elfogyasztja az ózontól származó OH-t, ami megfosztja a metán légköri tartozkodásának időtartamát.

A CF₂Cl₂ (a CCl₃F-fel együtt) a spray-ek fűvógáza, a hungarocell-gyártás felfűvó gáza, a hűtőszekrények hűtőkörének munkanyaga. A CF₂Cl₂ (freon) molekula infravörös elnyelőképesége a CO₂-ének tízezeresere, ezért az említett iparok freon-termelése különösen súlyosan esik latba. E vegyületek másik káros hatása, hogy erős poláros kötéseivel bontják a magaslégköri (sztratoszférikus) ózont, így szerepük lehet a sarki ózonlyuk utóbbi években, elsősorban 1987-ben tapasztalt megnövekedésének. A sztratoszférikus ózonpajzs a Nap ultrabolya sugárzásának gátja, elvékonyodása fokozottabb ultrabolya-besugárzást eredményezhet, ami károsíthatja a tengerek élővilágát (megszakítva a táplálékláncot). Embebreknél növelheti a bőrrák gyakoriságát. Ezért a fontosabb országok (köztük hazánk) által (1987-ben) aláírt Montreáli Jegyzőkönyv 1993-ra ezen vegyületek termelésének 20%-os, 1998-ra 50%-os redukciójára kötelez. De légköri mennyiségük még eme előírás betartása esetén is megkétszereződne 2000-ig.

Fentiek mutatják, milyen komplex probléma az ipari forradalom által néhány évtized leforgása alatt felfokozott üvegházhatás. Ilyen gyors változást az óceán és a növényzet nem tud nyomkövetni, nem képes ellensúlyozni a szennyező gázok fokozódó kibocsátásának éghajlati hatásait. Számítógépes légköri modellekkel előrejelezhető a klímaváltozás. A leg-részletesebb modellek 300 km × 300 km méretű négyzetekre bontják a Föld felszínét, és az egyes légszlopokban 10 perces időlépésekben követik nyomon a légkör változásait. A prognózisban természetesen figyelembe kell venni, hogy a népességnövekedés növeli a szennyezőgázok (ipartól függetlenül is a metán) kibocsátását, fokozza az erdőirtás igényét. Az elsivatagosodás csökkenti a szén-dioxid-megkötőképességet. A hőmérséklet-emelkedés a magashegyi hósapkák és jégárak olvadásával (később pedig Grönland, majd végül az Antarktisz jegének olvasztásával) csökkenti a talaj napfény visszaverő képességét (albedóját).

A hőmérséklet-emelkedés által kiváltott jégolvadás napfény-elnyelést és vízpárolgást (infravörös elnyelést) fokozó hatása mutatja, hogy erősen nemlineáris, pozitív visszacsatolású rendszerrel állunk szemben, amelynél a

katasztrófális megszaladás veszélyét sem lehet kizárni. (Csupán szemléltetés céljára: a pokolian forró Vénusz ilyen megszaladt üvegházhatás áldozatának tekinthető.)

A mai légkör szén-dioxid koncentrációja 350 milliómod rész. A különböző légkör-modellek szerint ezen ekvivalens koncentráció megkétszereződése $3 \pm 1,5$ °C hőmérséklet-emelkedést eredményez. Pontosabb azt mondani, hogy legalább 1,6 °C és legfeljebb 4,9 °C a becsült hőmérséklet-emelkedés. Tájékozódásul: az utolsó jégkorszak mélypontja óta (18 000 év alatt) mindössze 4,9 °C volt a globálisan átlagos hőmérséklet-emelkedés. Ehhez járul a többi nyomgáz hatása, ami azok gyorsabb szaporodása miatt további hasonló mértékű hőmérséklet-emelkedést ad.

3–10 fokos hőmérséklet-növekedés több méteres tengerszint-emelkedésre vezet. A velejáró tartós és időszakos özönvizek egymilliárd embert tehetnének földönfutóvá, a Föld termőterületének 1/4-ét fenyegetnék. Ennek kivédésével még Hollandia gazdasága is nehezen bírkozna meg, de a Nílus, Gangesz, Mekong deltájának népei képtelenek lennének azt megelőzni.

Hazánknak nincs tengerpartja. Olaszországban, Görögországban utazgatva egész kellemesen el tudnánk képzelni Magyarországon is pár fokkal melegebb éghajlatot, mondjuk: fagymentes telet, örökzöld tájat. Vegyük azonban figyelembe: hazánk az erdők és puszták határán helyezkedik el, benyúlnak hozzánk Nyugat- és Kisázsia száraz sztyeppéi. A jelzett mértékű felmelegedés hatására az erdőhatár néhány száz km-rel északra szorulhat. A részletes légkör-modellek szerint a mérsékelt égöv egyenlítőhöz közelebb eső sávjában csapadékhiány, a távolabbeső mérsékelt övben csapadéktöbblet várható. Európa és Amerika jelenlegi búza-, főleg pedig kukorica-termő vidékei mediterrán pusztává válnak (gondoljunk Görögország és Spanyolország kopasz tájaira). A búza- és kukorica-övezet felcsúszna Kanadába, Lengyelországba, Szibériába. (3 fok átlagos felmelegedés a sarkkör telének 10 fokos enyhülését jelentené.)

A fentiek szemléltetik azt az egybehangzó tudományos következtetést, amit az 1988-as hágai értekezleten irányító politikusok (köztük Németh Miklós) is elfogadtak: az emberiség nem engedheti meg a széndioxid koncentráció megkétszereződését.

A korábbi évek éhínségokozó afrikai szárazsága, az Egyesült Államok 1987-es aratásának negyedét elvívó hosszú forró nyár, az itthon is feltűnően enyhe telek, 1989 nyarán a londoni vízcsapokat is kiszárító nyugat-európai hőség a közönség figyelmét ráirányították az üvegházhatásra. Búza-aratásunk bőséges volt az elmúlt években, mert a búza a nyári szárazság előtt beérett, de a nyáron fejlődő kukorica-termés tavaly is szárazsághátrahagyott. Az évszázad legmelegebb nyarai az 1980-as években sűrűsödtek. A meteorológusok vitatkoztak, hogy mindez már a felfutó üvegházhatás előhírnöke-e, hiszen éghajlat-

ingadozások máskor is voltak. A vitát eldöntötte a világoceán megmért több tized fokos felmelegedése. Amint James Hansen, a NASA Goddard űrkutatási Intézetének igazgatója jelentésében megfogalmazta (1988. júniusában): "Észleljük az üvegházhatás fokozódását, az már ma is változtatja az éghajlatot." A halogató *Várj és láss* taktika egyébként sem alkalmazható az óceán nagyfokú hőtehetetlensége miatt.

A rohamosan fokozódó üvegházhatás erdőtelepítéssel (biológiai úton) aligha védhető ki. Nemcsak az erdők lassú (évszázados) fejlődési ideje a gond. 1 km² fenyőerdő 600 tonna, 1 km² trópusi esőerdő 900 tonna szén-dioxidot köt meg. Ennek mintegy 60%-át tartja meg biomasszában. (Így keletkeztek a kőszéntelepek.) A jelenlegi óriási szén-dioxid kibocsátás (évente > 18 milliárd tonna CO₂) megkötéséhez 20–50 millió km² trópusi esőerdőre volna szükség (ez a szárazföldek teljes területének egynegyede-egyharmada). Hogy a kibocsátás növekedését ellensúlyozzuk, évente 0,2 millió km² erdőt kellene telepíteni. (Összehasonlítául: Magyarország területe 0,1 millió km².) Jelenleg évente több mint 0,001 millió km² az erdőterület irtásos csökkenése. (A Föld erdőborította területe 5000 éve a szárazföld 36%-a volt, 1860-ban 28%, ma 23%, és évi 0,5%-kal csökken.) ehhez járul még a szennyezett fosszilis tüzelőanyagok elégetése által okozott savanyú esők erdőpusztító hatása.

Jelenleg az emberiség energiafogyasztása évente 2%-kal növekszik. (Gondoljunk a tévék, hűtőládák, autók számának hazánkban is tapasztalt terjedésére.) Csak ezt a trendet elfogadva, az energiafogyasztás jelentős hányadát fosszilis tüzelőanyagból fedezve a légkör szén-dioxid tartalma

$$1,02^t = 2$$

egyenlet megoldásából $t=35$ év múlva, 2025-ben duplázódik meg. Láttuk, hogy a CO₂-koncentráció megkétszerezése megengedhetetlen. Cselekedni kell.

Rövid távú időnyerésre ad lehetőséget a szén-fluor-klór vegyületek gyártásának teljes tilalma. A világ jelenlegi energiafogyasztása 10 milliárd tonna szénkvivalens/év. (1 tonna feketeszen CO₂-kibocsátása 870 liter kőolaj elégetésével egyenértékű. A feketeszen-egyenérték a kőszén, kőolaj és földgáz teljes elégetését foglalja magába.) A világ népessége 5 milliárd fő, tehát a jelenlegi fejenkénti energiafogyasztás 2 tonna szénkvivalens/fő/év. Az iparosított országok fosszilis tüzelőanyagfogyasztása ennél jóval magasabb. Az USA lakossága a Föld népességének 5%-a, de onnan származik a CO₂-kibocsátás 25%-a.

USA	10 tonna szénkvivalens/fő/év
NSZK	8
NDK	6
Magyarország	4
Japán	4
Kína	0,7
India	0,3

Az iparosodott országokban rendkívül erős redukción követel a józan ész és felelősség. Az iparosodott országok (1 milliárd ember) termelik a szén-dioxid nagyobbik felét. (A Nyugat részesedése 49%, a KGST részesedése 20%.) Az iparosodott országok lakossága viszont állandósult, míg a fejlődő országok népessége meredeken emelkedik: a mai 4 milliárdos lélekszám (mai 1,65%/év szaporodási ütemben) 40 év alatt megduplázódna. Ez azt jelenti, hogy az iparosodott 1 milliárd a mai európai átlagfogyasztást (4,5 tonna/fő/év) őrizve 40 év múlva is 4,5 milliárd tonna szénkvivalenst fogyasztana, a 8 milliárdra szaporodott fejlődő népesség viszont, elérve a mai 2 tonna/fő/év világlátlagot, 16 milliárd tonna szénkvivalens fogyasztana évente. Ez pedig 40 év alatt a szén-dioxid kibocsátás megkétszerezését jelentené, amit elfogadhatatlannak ítélnék.

Erkölcsileg nehezen volna indokolható eltérő fejenkénti fogyasztási normák engedélyezése Észak és Dél számára. Így adódott a keserű következtetés, amit az NSZK Fizikai Társulat és Meteorológiai Társulat fogadott el és terjeszt az Európai Fizikai Társág elé: *1 tonna kőszénkvivalens fosszilis tüzelőfogyasztás fejenként, évente.* Ez is csak addig engedélyezhető, amíg a Föld népessége el nem éri a mainak másfélszeresét. Csak ilyen feltételek mellett redukálható a CO₂-kibocsátás, fékezhető le a megszaladni készülő üvegházhatás. *Ha a Föld népessége nem áll meg a mai szám másfélszeresénél, akkor elkerülhetetlen a fejadag további mérséklése.*

Megszaladó világnépesség még kemény CO₂-korlátok mellett is megköveteli az élelmiszertermelés fokozását, ami arányosan növelné a CH₄-emissziót. A Föld népességét az üvegházhatás miatt is korlátos értéken kell tartani. Ez a fejlődő országoknak szóló kemény üzenet.

A mai európai energiafogyasztás (4,5 kőszénkvivalens/fő/év) valamelyest csökkenthető, de nem egynegyedére. Mind több család igényel nagyobb (fűtött) lakást, televíziót, autót, hűtőszekrényt, fagyasztóládát. Való igaz, hogy a 10 liter/100 km fogyasztású autót 5 liter/100 km fogyasztású autók válthatják fel. A földgáz valamivel jobb hatásfokú szabadenergia-forrás, mint a kőszén: (1 kW órát a szén mellett hidrogént is oxidáló gázturbina jobb hatásfoka miatt is kevesebb CO₂ kibocsátásával állít elő), de földgázból kisebb a készlet. A hőerőművek termodinamikai hatásfoka 32% körül van. Ha a hűtővíznek leadott hő fűtésre (távfűtésre) hasznosítanak, a 68% veszteség 15%-ig lenyomható lenne. A teljes európai és magyar energiafelhasználás 50%-ot elérő csökkentése még így is nehezen képzelhető el. Kötelező tehát e konklúzió: *az energiafelhasználás nagyobbik hányadát nem-fosszilis energiaforrásból kell fedezni.* Ilyenek a megújuló energiaforrások (tűzifa és más biomassa, vízi erőmű, trópusokon a napenergia, tengerparton a hullám, az árapály és a szél energiájának hasznosítása, valamint az atomerőművek).

A megújuló energiaforrások hasznosítási lehetősége éppen az ipari országokban korlátozott. A tűzifa járuléka az NSZK-ban 1,7%. Izraelben a napenergia járuléka 7%. A szél és az árapály csak tengerparton jelentős. A vízi energia szinte teljes hasznosítása elkerülhetetlen lesz, de a megújuló energiaforrások legoptimistább vélekedés szerint sem válhatnak ki többet, mint 1 tonna fosszilis tüzelőt fejenként, évente. És ez a kiváltott hányad nagyon sokba fog kerülni. *A megújuló energiaforrások ilyen arányú hozzájárulása csak magas energiaadó és fejlesztést segítő kormánytámogatás mellett közelíthető meg.* Végtére is a Nap nem mindig akkor süt, amikor fűteni kell.

A fűtés, ipari munkagépek működtetése, a közlekedés és a villamos energia felhasználása kb. 30%:30%:20%:20% arányú. A közlekedés (autó, repülő) igényli leginkább a benzint. Napenergiával elsősorban vizet lehet melegíteni. A (korlátozott) vízi energia és a (fejleszthető) nukleáris energia lesz kényszerűen az erőművek fő táplálója. A városok fűtését az atomerőművek hulladék hőjével meg lehet oldani, de ehhez az erőműveket a városokhoz közelebb kellene telepíteni. Tovább kell tehát fokozni az atomerőművek inherens szerkezeti biztonságát. Nem szabad utat engedni emberi tévedéseknek. A világ gazdaságosan kitermelhető uránkészlete 6 millió tonna (a teljes uránmennyiség 30 millió tonna) lehet. Mai színvonalú atomerőművekben ezek felhasználása 35 milliárd (240 milliárd) tonna CO₂ emisszióját válthatja ki. Tenyészőreaktorban nagyságrenddel többet. Hasadási atomerőművek építésével évtized haladékot kaphatunk. Hazánk szerencsére nincs az európai CO₂-termelő országok élmezőnyében, hála annak, hogy a Paksi Atomerőmű fedezi a hazai villamos energiatermelés 46%-át, és további 30% villamos energiát importálunk szovjet atomerőművekből. A téli csúcsgigény egy részét a Dunán épült osztrák vízi erőművek fedezik. Ha hazánk az európai nemzetek közösségének befogadott tagjává kíván válni, csökkenteni kell a freontermelést és a kén-oxidok kibocsátását, amire már most aláírt nemzetközi szerződések köteleznek. Lehet, hogy nem sokára CO₂-kibocsátást korlátozó szerződést is alá írnunk. Ezért meggondolandó a további fosszilis tüzelőt (szént, földgázt) használó erőművekbe történő beruházás.

A szegedi egyetem kutatói megkérdezték érettségi előtt álló magyar gimnazisták statisztikusan jellemző mintáját: "Feltéve, hogy iparunk energiaigénye nem növekszik, csak a lakossági fogyasztás, miként irányítanád hazánk villamosenergia-politikáját az 1990-es években?" A válaszok különböztek a hivatalos elképzelésektől:

fosszilis tüzelővel	5%
vízierőművel	19%
új atomerőművel	59%
villanyimportból	8%
fogyasztáskorláttal	2%
nem tudja	7%.

A fokozódó üvegházhatás tudományos háttere érthető. A jövő számítógépes modellekkel prognosztizálható. A tudományos figyelmeztetések fogantatja mégis kétséges, mert az emberiség hosszú távú globális érdeke ütközik az egyén (a lokális közösség) rövid távú anyagi érdekével. Nehezen képzelhető el, hogy hazánk egész autóparkját a következő években öt sebességfokozatú, fordulatszámjelzős, 5 liter/100 km benzinfogyasztású, katalizátoros kipufogójú, ólommentes benzint használó kocsikra cseréljük át. Lehasznált és rossz hatásfokkal üzemelő autók olcsóbbak. A gázturbinás erőmű beruházási költsége kicsi a vízi erőműéhez vagy atomerőműéhez képest. Régi szén-erőműveink kén-dioxid és szén-dioxid kibocsá-

tása eltöri a nagyobb szomszédaink légszennyezése mellett: ha mi vállalnánk is többletköltségeket, de mások nem, nem tudnók megváltani az emberiséget.

A földi éghajlat sorsa elsősorban nem tudományos kérdés, nem is csak műszaki, hanem nagymértékben etikai probléma. Egyéni érdeken felülálló globális felelősséget kialakítani csak átgondolt nevelési programmal lehet. A fejlődő országok népesedéspolitikája a (katolikus, mohamedán) valláserkölcsei nevelés irányváltoztatását kívánja meg. A fejlett országok – köztük hazánk – individualista fogyasztói ideáljának önzetlen globális etikára történő nemesítését a szerző véleménye szerint elsősorban a természettudományokat tanító tanároknak kell vállalniuk.

EURÓPA – EGY ÓCEÁN LEHETŐSÉGE

R. T. Reynolds,
S. W. Squyres, C. P. McKay, J. F. Kasting

Bevezetés

Amennyire megállapítható, Földünk az egyetlen bolygó a Naprendszerben, amely életet hordoz. Természetes ezért, hogy az életet planetáris jelenségnek tekintjük, és a Föld-szerű bolygókon keressük. Annak valószínűségét például, hogy létezhet-e élet más csillagok bolygóin, a Föld-szerű bolygók számára levezetett "lakható zónák" koncepciója alapján becsülték meg [1,2]. Ezen klasszikus "lakható zónák" belül az egyetlen energiaforrás a bolygó felszínén a csillag fénye. Ezért e zónák a bolygórendszerek belső részére korlátozódnak.

Naprendszerünk külső vidékeinek űrszondás vizsgálata azonban feltárta, hogy az óriásbolygók holdjainak némelyikén jelentős lehet az árapályfűtés következtében létrejövő belső hőforrás. Legdrámaibb eset az Io, vagyis a Jupiterhez legközelebbi Galilei-hold, amelyen kiterjedt, heves, az árapályfűtés által fenntartott vulkáni aktivitást figyeltek meg. Az árapályfűtés az Europa holdon fenntarthat egy folyékony óceánt a viszonylag vékony szilárd jégkéreg alatt. Bizonyos jelek arra mutatnak, hogy volt, vagy van árapályfűtés a Szaturnusz Enceladus holdján és az Uránusz Ariel és Miranda holdjain is.

A külső bolygók holdjait, mint a biológiai aktivitás lehetséges helyeit vizsgálva fontos felismerni, hogy méreteik jelentősek lehetnek. A Ganymedes és a Titán nagyobb a Merkúr bolygónál, és a Callisto sem

sokkal kisebb nála. A Titán, a Szaturnusz legnagyobb holdja 1,5 bar felszíni nyomású légkörrel rendelkezik, amely főképp N_2 -ből áll némi CH_4 -gyel vegyítve. A Titán légkörében több, mint 9 szerves molekulát fedeztek fel.

Mindezen sajátosságok kombinációja létrehozhat lakható holdakat a Naprendszer külső részén. A folyékony óceánt borító vékony jégkéreg, ha felhasadozik, olyan kisméretű átmeneti zónákat hozhat létre, melyekben alkalmas fizikai környezet és elegendő napfény van a fotoszintézisen alapuló élethez. A geotermális energia is jelentős mértékű hozzájárulást képviselhet. Noha a Naprendszerünkben lévő holdakon aligha van az élet kifejlődésére alkalmas környezet, más bolygórendszerekben alkalmasabb feltételek is előfordulhatnak. Továbbá, ha egy nagy természetes hold légkörrel rendelkezik, és élete során elegendő árapályfűtésnek van kitéve ahhoz, hogy felszíne fagypontra fölé melegedjen, akkor elképzelhető, hogy ott az élet kifejlődik.

E dolgozatban azt vizsgáljuk, hogy milyenek a lehetőségei a külső Naprendszer holdjain víz-környezet kialakulásának. Elsősorban az Europa esetét vizsgáljuk, és tárgyaljuk annak lehetőségét, hogy a megfigyelhető jégréteg alatt árapályal fűtött óceán található. Azután röviden áttekintjük a lehetséges lakóhelyeket, amelyek más naprendszerekben jöhettek létre.

2. Árapályfűtés

Árapályerők azért hatnak egy holdra, mert a bolygó nehézségi erőtere változik a hold testén belül. A hold belsejének az a része, amely közelebb

Elhangzott az Élet az Univerzumban konferencián, Balatonfüreden, 1987. Fordította: Illés Erzsébet. Csillagászati Kutató Intézet