

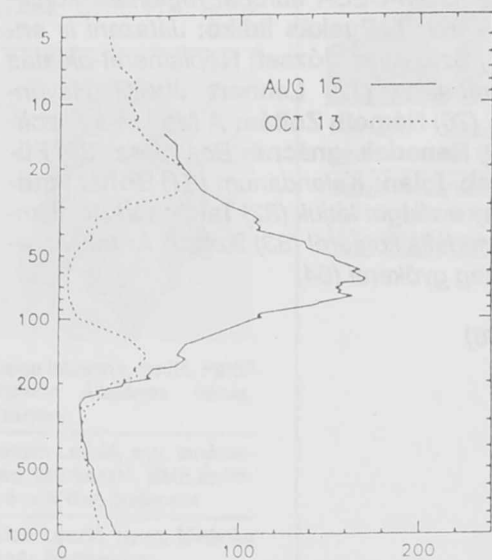
Védőpajzsunk az ózon

TÓTH ZOLTÁN

Mostanában szinte szünet nélkül drámai hangvételű cikkek jelennek meg a sztratoszférikus ózon csökkenéséről a tömegtájékoztatóban. Ezeknek alapja a kb. másfél éve az egész mérsékelt övben folyamatosan tapasztalható ózonhiány. Az aggodalmat az a ma már egyre közismertebbé váló tény váltja ki, hogy az ózon csökkenése az élővilágra káros ultraibolya-sugárzás intenzitásának növekedését okozza a földfelszínen. A félelmet még tovább növeli, hogy a köztudatban a mérsékeltövi ózonszökkenés elég nagy százalékban „ózonlyukként” él.

Ózon és Uv-sugárzás

A Naptól érkező elektromágneses sugárzás a földi légkör folyamatainak legjelentősebb energiaforrása. Számítalan hatása van és számítalan információt nyerhetünk belőle. Nem más ez, mint csaknem 300 000 km/s sebességgel térbeli hullámként terjedő elektromágneses energia. Megtalálhatók benne mindenféle hullámhosszak a legrövidebbektől a leghosszabbakig, persze különböző mennyiségben. Legnagyobb mennyiségben az a hullámhossztartomány van benne képviselve, amelyre szemünk is érzékeny, s épp ezért látható fénynek hívjuk. Manapság már a „hétköznapi” ember számára is ismert minden egyes tartománya legalább az elnevezés erejéig, amelyek a rövidebbektől rendre a hosszabb hullámhosszak felé haladva a gamma-, a röntgen, az ultraibolya-, a látható-, az infravörös-, és a rádió tartomány. Ez nyilvánvalóan az ember által használt felosztás a detektálás és felhasználás jellege, mikéntje szerint. A különböző légköri gázok, illetve



1. ábra

Az ózontartalom magasság szerinti eloszlása

A különböző lebegő aeroszokok különböző mértékben elnyelik, illetve szórják a légkörbe érkező elektromágneses sugárzás hullámhosszait. Az ózon több módon is kiemelkedő szerepet játszik az ultraibolya sugárzás gyengítésében. Ennek megértéséhez ismerkedjünk meg kicsit részletesebben az ultraibolya (UV) sugárzással. Ezt a tartományt három részre osztjuk (extrém UV, vagy más néven UV-C (hullámhossza: 100-280 nm), UV-B (280-320 nm), UV-A (320-400 nm)). A légkörbe érkező extrém Uv-sugárzás energiája kell ahhoz, hogy a kétatomos oxigénmolekulákból fotokémiai reakció útján ózon (O₃) keletkezzen. A legtöbb ózon az alsó sztratoszférában (15-20 km) keletkezik, mert itt már elég sok az oxigén és még elegendő extrém UV energia áll rendelkezésre. (1. ábra) Ezek a fotokémiai reakciók jelentik az ózon keletkezési mechanizmusát a sztratoszférában. Az extrém Uv-sugárzás energiája közben felemészti az „ózongyártásban” mielőtt a légkör alsóbb rétegeibe

érne. Az UV-B tartományba eső sugárzást pedig maga a légköri ózon nyeli el nagymértékben, így igen csekély a felszínre érkező UV-B sugárzás intenzitása. Az UV-B tartományon belül az ózon abszorpciós koefficiense (elnyelési együtthatója) rendkívül erősen csökken a növekvő hullámhosszal, míg a napsugárzás erőssége viszont erőteljesen növekszik. Így 300 nm alatt alig érkezik a felszínre mérhető jel. Spektrofotométerrel végzett méréseink – amellyel 300 nm és 1100 nm között tudunk 1 nm felbontással mérni – 300 nm-nél rendkívül gyenge a mérhető jel.

A légkör ózontartalmának meghatározása

Először ismerkedjünk meg röviden azzal, hogyan mérjük a légkör ózontartalmát. Egy légoszlop teljes ózontartalmát az ún. Dobson-spektrofotométerrel mérjük. Ez a legnagyobb pontosságú berendezés az összózonttartalom meghatározására, jelenleg az egész világon mintegy 150 található belőle. Ezek legnagyobb része az északi féltekén működik, közülük egy az *Országos Meteorológiai Szolgálat Magaslégköri Megfigyelési Osztályán*. Ezzel a spektrofotométerrel a Napra célzunk és a Napból érkező ultraibolya sugárzás gyengüléséből számítjuk ki a légkör ózontartalmát. Ha a Napot felhők takarják (azaz nincs ún. direkt sugárzás), akkor a zenitből érkező szórt sugárzásból határozzuk meg az ózon mennyiségét. E közvetett módszer pontossága megközelíti a direkt módszerét. Naponta több mérést is végzünk, a mérési eredményeket átlagoljuk. A napi átlagértékek az adatsor jellemzőinek vizsgálatához elegendőek, mert az összózonttartalom egy nap alatt gyakorlatilag nem változik. Az ózontartalom mértékegysége a Dobson-egység (DU; Dobson Unit, azaz 10 atmoszférikus centiméter). A 300 DU ózontartalom tehát azt jelenti, hogy ha az összes légkörben lévő ózont lehoznánk tengerszinti légnyomásra, akkor az ózonmennyiség egy 3 mm vastag réteget képezne.

Az összózonttartalom, illetve a felszínre érkező UV-B sugárzás intenzitásának meghatározása mellett általában arra is kíváncsiak vagyunk, hogy mekkora az ezzel járó dózis az élő szervezetek számára. Ehhez olyan érzékelő szükséges, amelynek az érzékenységi görbéje jól közelíti a bőr érzékenységi görbéjét (erythema). (Örömmel közölhetem, hamarosan működni fog hazánkban is az a néhány állomásból álló monitoring-hálózat, amely egyben a felszínre érkező UV-B sugárzás több aspektusból történő vizsgálatának is alapbázisául szolgálhat.) Napjainkban van egy biofizikusok által kifejlesztés alatt álló más mérési módszer is, amelynek az a lényege, hogy bizonyos bakteriumfágok pusztulási rátájából határozza meg a biológiailag aktív UV-dózist. (Magyarországon a SOTE Biofizikai Intézete végez ilyen méréseket.)

A kiértékelések nehézségei

A felszínre érkező UV-sugárzást több tényező határozza meg, amelyek között igen gyors változékonyságúak is találhatóak, így meglehetősen nehéz annak meghatározása, hogy a felszínre érkező ultraibolya sugárzás intenzitásában melyik tényező milyen szerepet játszik. Az azonban kétségtelen, hogy elsősorban a Nap horizont feletti magasságától függ, de jelentősen befolyásolják azt a légkör aeroszol-viszonyai és az ózon mennyisége. Az angol monitoring hálózat mérései szerint átlagos esetben nyáron tízszer akkora dózist kapunk, mint télen. A nálunk rendelkezésre álló UV-számító modell szerint, ha valaki mondjuk Helsinkiből Krétára megy nyaralni, hasonló aeroszol- és ózon-viszonyok mellett másfélszeres dózist ér. A modellszámítások szerint 1%-os ózoncsökkenés csaknem 2%-os UV-B növekedést okoz a földfelszínen. A számítások eredményei persze nagy óvatossággal kezelendők, ugyanis a légköri szórás jelentős szerepe miatt az UV-tartományban a sugárzásátvitel számításának elég nagy a bizonytalansága, így a kapott eredmények eléggé modellfüggőek. Azonban mindenesetre megállapítható, hogy az ózonhiány nem minden esetben ad okot a pánikra, hiszen az egyik januári héten 30 %-os ózonhiányt detektáltunk, ami másfélszeres UV-dózis növekedést okozott, de ez ezzel együtt is a nyáron szokásos értéknek csak törekéde. A következőkből azonban egyértelműen kiderül, hogy nincs minden rendben. Az ózoncsökkenés okairól beszélve külön kell választanunk

az Antarktisz fölötti ózoncsökkenést (ózonlyuk) és a mérsékeltövi ózoncsökkenést. Ma úgy tűnik, hogy a mérsékeltövi ózon csökkenésének okait lényegesen nehezebb megállapítani, mint az antarktiszit. A mérsékeltövi ózoncsökkenés napról napra való ingadozása lényegesen nagyobb, mint a csökkenés mértéke, ezért az adatsorokból a csökkenési trend első pillantásra nem is látszik. A mérsékeltövi obszervatóriumok adatsorainak matematikai vizsgálatai alapján azonban nyilvánvalóvá válik a kétség kívül meglévő csökkenő trend. Az ózoncsökkenéséért elsősorban a sztratoszféra kémiai állapotának az utóbbi évtizedekben megfigyelt fokozódó változása okolható. A sztratoszférában egyre növekszik azoknak a nyomgázoknak a mennyisége, amelyek pusztítják az ózont. Ehhez azonban meg kell jegyeznünk, hogy a modellszámítások szerint ez csak a tapasztalható trendnek „legjobb esetben” is legfeljebb a felét teszi ki. A csökkenés mértékének másik része leginkább az éghajlati rendszer belső autonómiájával magyarázható, azaz az éghajlati rendszerben fellépő bonyolult (nem lineáris) visszacsatolási mechanizmusokkal, amelyek az ózommennyiség alakulásában is rövidebb, vagy hosszabb időtartamú változásokat indukálnak. Ezek között lehetnek periódikusak is, amely okozhatja a megfigyelt csökkenő trend egy részét, amennyiben jelenleg éppen leszálló ágban vagyunk. Az objektív értékelést nagy mértékben megnehezíti az is, hogy az ózommennyiség alakulása területileg is változékony.

Más a helyzet az antarktisz ózonlyukkal. Ez egy nagyon kifejezett, területileg is, időben is jól behatárolható folyamat. Az ilyenek vizsgálata könnyebb a szakemberek számára. Az ok-okozati viszonyokat persze itt sem lehet elsőre kitalálni. A könnyebbséget az jelenti, hogy a vizsgálatok során bizonyos folyamatok, mechanizmusok szerepe egyértelműben támasztható alá, vagy vethető el. Az „ózonlyuk” a mérsékelt övek ózoncsökkenésével ellentétben feltűnő és drasztikus jelenség.

Ózonlyuk

Az ózonlyuk elnevezés ugyan a tudományos terminológiában terjedt el, de nyilván nem valami tényleges lyukat jelent. A figyelemfelkeltő kifejezés a jelenség erőteljességére utal. Az ózonlyuk az antarktikus vidékeken az ottani koratavasszal jelenik meg és 1,5-2 hónapig áll fenn, amely időszak alatt átlagosan az összózon tartalomnak a fele tűnik el, de előfordult olyan nap is, amikor Argentína antarktisz mérőállomásán 85%-os ózonhiányt detektáltak. Ma már úgy tűnik, hogy e jelenség okát pontosan ismerjük, az elméleti elképzeléseket a mérési adatok is egyértelműen alátámasztják. Az Antarktisz fölött télen egy intenzív stabil örvény alakul ki. (Az arktikus vidékek fölött ilyen nem tud kialakulni, mert az áramlási rendszer jóval bonyolultabb, változékonyabb, ezért a kialakulóban levő örvény nem stabilizálódhat.) Az örvényen belül nagyon le tud hűlni a levegő, akár -87 vagy -90 fokra is. Az északi sarkvidék sztratoszférája ennél mindig legalább 10 fokkal melegebb. Ilyen alacsony hőmérsékleten az ott igen kis koncentrációban található vízgőz jéggé tud fagyni és így kialakulnak a poláris sztratoszférikus felhők (PSC). A poláris sztratoszférikus felhők részecskéinek felületén olyan klórtartalmú vegyületek (leginkább a ClNO és a HCl) lépnek reakcióba egymással, amelyek más körülmények között semlegesek és a lejátszódó reakciókban felszabaduló igen aktív klór támadja meg az ózont. Ez a folyamat azonban magában nem képes akkora ózonpusztítást véghez vinni, mint amekkorát tapasztalunk, azaz valaminek még történnie kell. A jelenség magyarázatában itt lépnek színre a sokat emlegetett freonok. Ezek olyan halogénezett szénhidrogének, amelyeket az iparban rendkívül széles körben (ipari tartályok hűtőközegeként, spray-k hajtógázaként, oldószerként, habanyagok gyártásánál) alkalmaznak. Ezek kémiailag semlegesek, nem mérgezőek, nem roncsolnak semmit. Az ipari alkalmazások következtében hosszú időn keresztül nagy mennyiségben kerültek ezek az anyagok a légkörbe, felhasználásuk különösen az 50-es években emelkedett meg ugrásszerűen, aminek következtében az utóbbi évtizedekben a sztratoszférában is feldúsultak.

Nézzük meg mi történik az Antarktisz fölött, amikor véget ér a tél. A Nap megjelenik a horizonton, a levegő lassan melegszik és a poláris sztratoszférikus felhők lassan letűnnek a színről. Ekkor a felkelő Nap ultraibolya sugarai főlzabadijtják a freonokból az addig bennük békésen szunnyadó klórt. Ez a nagy mennyiségben felszabaduló klór már hatal-

mas pusztítást tud véghezvinni az ózonban. Később, amikor a sztratoszféra már annyira felmelegedett, hogy a korábbi folyamatoknak (poláris sztratoszférikus felhőkbeli reakcióknak) már nem kedvez, a nagy ózonrombolásnak is vége szakad. A tavasz végének második felére mér egész szépen rendeződik a sarkvidék megtépázott ózonkészlete.

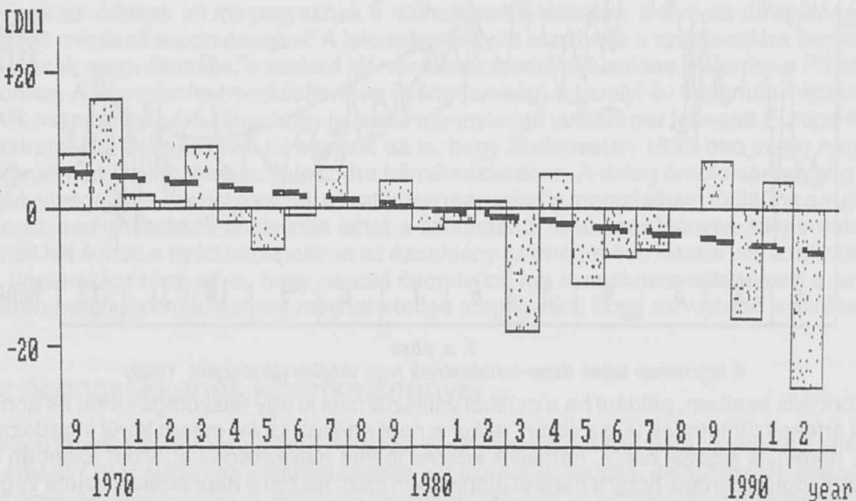
Mérsékeltövi ózonszökkenés

Az Országos Meteorológiai Szolgálat 1969 óta méri Budapesten a légkör teljes ózontartalmát. A 2. ábrán az évi átlagos anomáliákat, a sokéves átlagtól való eltéréseket tüntettük fel. Az ábrán a szaggatott vonal jelzi az ezekre illesztett trendet. Trendvizsgálataink azt mutatják, hogy egy 1,7%/10 éves csökkenő trend észlelhető az adatsorban. Ilyen eltérést tapasztaltak más mérsékelt övben működő obszervatóriumokban is. (A hozzánk legközelebbi ózon obszervatórium Csehországban, *Hradec Kralovében* van. Az ottani adatsornak szinte valamennyi statisztikai jellemzője nagyon közel áll a miénkhez.) Ennek a csökkenő trendnek – mint az előzőekben említettük – egyrészt a sztratoszféra kémiai állapotának az antropogén hatások miatti megváltozása a fő oka, de ma még nem teljesen tisztázott, hogy a megfigyelt trendben mekkora a szerepe az éghajlati rendszer belső autonómiájának. Az összózontartalom időbeli változásait ugyanis számos tényező alakítja. Az alsó sztratoszféra áramlatai jelentősen meghatározzák az egy adott hely fölött mért teljes ózonnemységet, ezért ezek változásai is jelentős hatást gyakorolnak az ózontartalom napról napra történő alakulására. Ezen kívül szintén a sztratoszférikus áramlások jellege következtében megfigyelhető egy éves periódus is koratavaszi maximummal és őszi minimummal. További két lényeges periódikus jelenség is befolyásolja az ózontartalmat:

1. A 10,6-10,7 év periódusú napfoltciklus. Ennek hatása érthető, hiszen a Nap emissziója függ a Napnak foltokkal való borítottságától, a relatív napfoltszámától függő UV-sugárzásingadozás nyilván az ózontartalomban is egy periódikus változást okoz. Ennek mértéke 4 DU, közel 1,2%.

2. A 2,3 év periódusú ún. „kvázi-kétéves oszcilláció”. Ez nem más, mint a sztratoszférikus légkörzés markáns átrendeződése, amely módosítja az ózon térbeli eloszlását, így változásokat okoz a mért ózontartalomban is. A változás mértéke 6 DU, közel 1,8%.

E periódikus összetevők együttes hatása változik aszerint, hogy milyen fázisban vannak egymáshoz képest. Az 1985-ös relatíve jelentős ózonhiány döntően ezek együttes hatásával magyarázható.



2. ábra

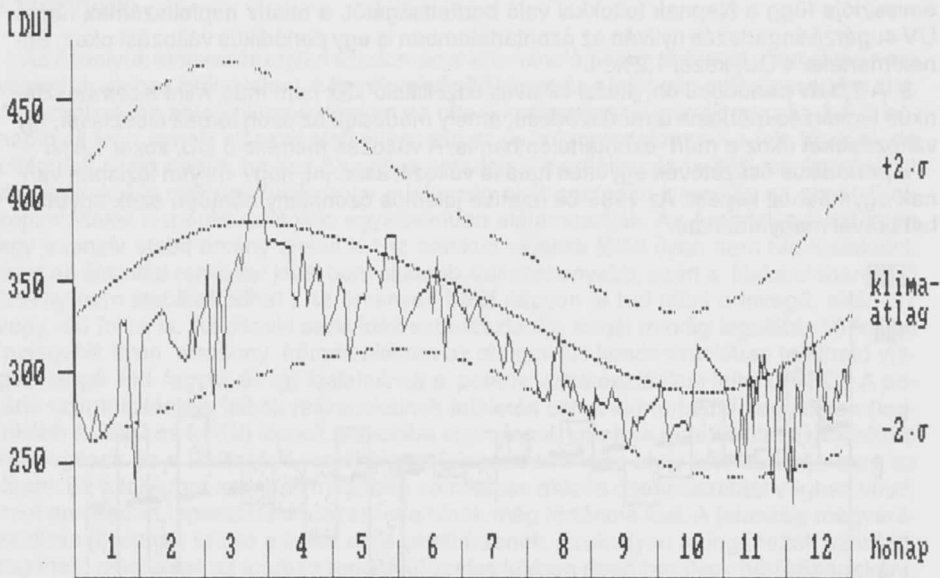
A légköri ózon évi átlagainak eltérése a sokévi (1969–91) átlagtól Budapest fölött

Az ózonsökkenés következményei

Van még egy befolyásoló tényező, amely nem periódikus és hatásának mértéke is elég vitatott. Ez a vulkáni tevékenység. Azok a vulkánok, amelyek extrém magasra (27-30 km) juttatják anyagukat, befolyásolni tudják az ózon mennyiségét. Ilyen vulkánkitörések persze ritkán fordulnak elő, legutóbb a Fülöp-szigeteki *Pinatubo* volt ilyen (1991 júniusában azelőtt pedig Mexikóban az *El Chichón* (1982)). A vulkáni eredetű aeroszol részint lehűti a sztratoszférát, részint pedig növeli a kondenzációs magvak számát. Ezek a körülmények pedig növelik az ózont lebontó kémiai folyamatok hatékonyságát. Ezek a vulkánkitörések nem nagymértékű, de elég hosszú idejű (csaknem 1 év) csökkenést okoznak az ózontartalomban. Az *El Chichón* hatása egyértelműen kimutatható a mérsékelt öv ózon-obszervatóriumainak adatsoraiból, így a budapesti adatsorból is, ami megfigyelhető az 1. ábrán. A *Pinatubo* kitörése pedig minden valószínűség szerint igen jelentős szerepet játszik az 1991-92 tele óta tartó ózonhiányban, amelyről az alábbiakban részletesen lesz szó.

Napjaink ózonhiánya

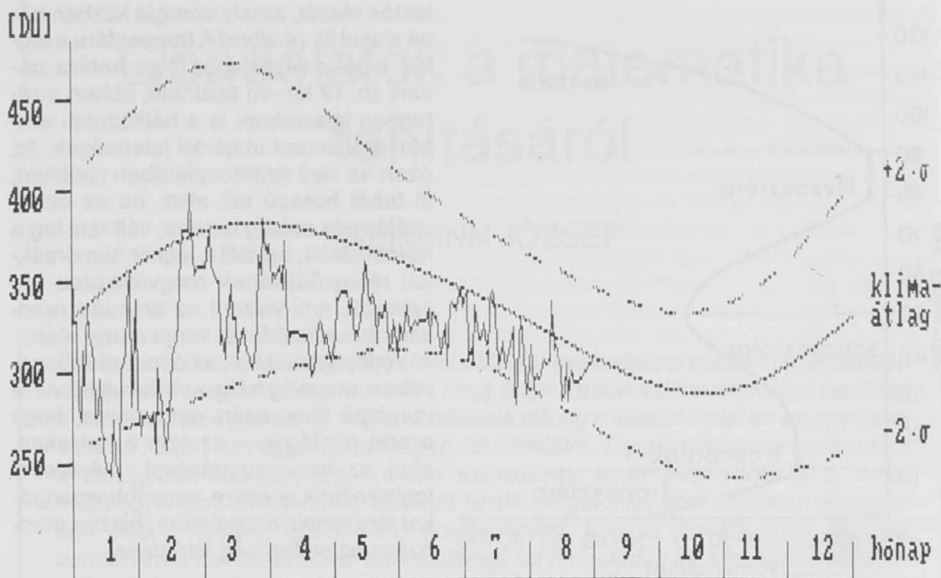
1991 decembere óta egy perturbált állapot figyelhető meg a sztratoszféra ózonviszonyaiban. Ez az állapot jól érzékelhető a 3. ábrán, amelyen a teljes ózontartalom napi értékeinek az átlagos évi menettől (napi értékek sokéves átlagaitól) való eltéréseit (anomália) látjuk Dobson-egységben Budapest felett. (Az alább közölt eredmények hasonlóak más mérsékeltövi, elsősorban európai és észak-amerikai tapasztaltakhoz.) A 3. ábrán a szaggatott görbék a múltban megfigyelt természetes változékonyság sávját jelölik, ami az adatok szórásának kétszerese.



3. a. ábra

A légszlop teljes ózon-tartalmának napi értékei (Budapest, 1992)

Normális esetben, például ha a múltból választanánk ki egy tetszőleges évet és annak napi értékeit tüntetnénk fel az ábrán, akkor a napi értékek az évi menet körül ingadoznának, némelyik kicsivel alatta, némelyik kicsivel fölötte helyezkedne el. Most azonban az ábráról rögtön látható, hogy a helyzet alapvetően más, hiszen a napi értékek szinte végig, elenyésző kivételtől eltekintve alacsonyabbak a mindenkor sokéves átlagnál. (Ez egészen pontosan a mérési napok 90%-ában igaz.) Az is megfigyelhető, hogy az ózondefi-



3. b. ábra

A légoszlop teljes ózon-tartalmának napi értékei (Budapest, 1993, január – augusztus)

citek nem extrémén nagyok, hiszen mindössze a mérési napok 7%-ában alacsonyabbak a természetes változékonyság alsó határánál. A jelenség tehát nem azért rendkívüli, mert az értékek rendkívülien alacsonyak, hanem az időtartam miatt. A szóban forgó időszakra az átlagos ózondeficit 9%. Nem volt még soha ilyen eset, hogy két egymást követő télen ennyire alacsony lett volna az ózontartalom. (1. táblázat)

	december	január	február
1991.	-6%	-17%	-9%
1992.	-10%	-16%	-17%

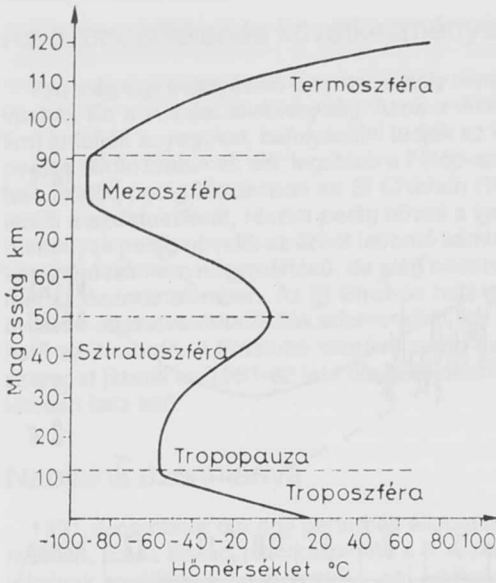
1. táblázat

Az ózondeficit értékei az elmúlt időszakban

Ezek az értékek jól megegyeznek a műholdas mérésekkel, illetve az űrrepülőgépről végzett mérések eredményeivel. A jelenséget együtt okozhatja a sztratoszféra kémiai állapotának megváltozása, a szabad klór és klórmonoxid feldúsulása, valamint a Pinatubo kitörése. A *Garmischpartenkirchenben* (Németország) a tavalyi év folyamán végzett LIDAR-os mérésekből tudjuk, hogy jelentős mennyiségű vulkáni por lebegett Európa fölött a sztratoszférában, amivel jól egyezik az is, hogy Budapesten 1992-ben végig negatív anomáliákat észleltünk a sztratoszféra hőmérsékletében. A dolog érdekessége, hogy az újabb vizsgálatok szerint a vártal ellentétben még mindig megtalálható fölöttünk a vulkáni por, ez pedig továbbra is okozója lehet a szüntelenül tartó ózonhiányos állapotnak. Az elmúlt két évben a nyári hónapokban az ózonhiány számottevően kisebb volt a téliekénél, de ugyanakkor tény az is, hogy az idej ózondeficit így is csaknem kétszerese a tavaly nyáron megfigyeltnek. Azt ma még lehetetlen megfigyelni, hogy mi várható a jövőben.

Az ózoncsökkenés következményei

Nem feledkezhetünk meg arról, hogy az ózommennyiség változása nemcsak a felszínre érkező UV-B sugárzás mennyiségének növekedését okozza, de hatással lehet a légkör áramlási rendszerére is, amelyről kevesebb szó esik. A sztratoszféra fűtéséért, azért a tényért, hogy a sztratoszférában a hőmérséklet magasabb, mint a troposzféra felső rétegeiben, nagyrészt az ózon a felelős, mert elnyeli a Naptól érkező UV-B sugárzás je-



4. ábra

A hőmérséklet magasság szerinti eloszlása

lentős részét, amely energia közben hővé alakul át. (4. ábra) A troposzféra a légkör legalsó légrétege, felső határa nálunk kb. 12 km-en található, ebben a rétegben játszódnak le a hétköznapi ember által ismert időjárási jelenségek. Az ózon az alsó sztratoszférában csökken, itt tehát hosszú idő alatt, ha az ózoncsökkenés sokáig tartana, változni fog a hőmérséklet, amiből a légkör hőmérsékleti rétegződésének megváltozása következik, ami viszont az áramlási rendszer átrendeződését vonja maga után.

Védőpajzsunkkal, az ózonnal kapcsolatban ma még elég sok a rejtély és a meglepő tény, ezért nem csoda, hogy szerte a világon – azokon a helyeken, ahol az ózon kutatásával, mérésével foglalkoznak – egyre nagyobb energiákat fordítanak vizsgálatára, hiszen megővése az emberiség létérdeke.

Magasság (km)	Hőmérséklet (°C)
0	15
10	-55
20	-45
30	-25
40	-10
50	0
60	-50
70	-80
80	-90
90	-70
100	-50
110	-20
120	10