

AZ OCEANOGRÁFIA „FÖLDRENGETŐ” MEGÚJULÁSAI A 21. SZÁZADBAN

REGŐS JÁNOS¹ ÉS O. FERENCZ ILONA²

¹Eszterházy Károly Egyetem TTK Biológiai Intézet Állattani Tanszék,
3300 Eger, Leányka u.6.

²Madách Imre Gimnázium Budapest
E-mail: dr.regosjanos@gmail.com

Összefoglaló

Az oceanográfia öt, a 21. századra megújuló, előtte többé-kevésbé félremagyarázott problémáját ismertetjük. (1) *Tengeri bakterioplankton*: a tengervízben ténylegesen jelenlévő, de agar-lemezekken nem tenyészthető prokarióták összömege több százszorosa a korábban becsült mennyiségnek, és ezáltal az óceáni biomassza > 80 %-át alkotja. (2) A tengervízben oldhatatlan vas (Fe^{+++}) tápanyagként való felhasználását a bakterioplankton által termelt ligandumokkal történő komplexképződés teszi lehetővé. (3) A fitoplankton *fotoszintézisének* optimális mélységét a napfény UV sugarainak abszorpciós csökkenése határozza meg. (4) Az *El Niño* jelenség okozója a csendes-óceánt átszelő ÉK-i ill. DK-i passzátszelek legyengülése, amely az egyenlítői áramlatok sok ezer km-es K-Ny-i folyását megfordítja, és a meleg trópusi víztömegeket ellenkező irányba, a hűvös perui partok felé készíti. (5) A Föld klímájának stabilitása nagyban függ a Golf-áramlat által táplált *termohalin cirkulációtól*, amely megszűnhet az északi félteke hatalmas jégtömegeinek megolvadásával, és a jeges vizek felhígulásával.

Summary

Earthshaking Reformation of Oceanography in the 21th Century

Modern interpretation of five, until the end of 20th century poorly understood topics in oceanography have been discussed. (1) Until the 1990s, *marine bacterioplankton* was thought only to be represented by those some dozens of germs per milliliter which are able to grow on agar plates. However, the oceans contain hundred times more living, but non plateable bacteria which represent > 80 per cent of marine biomass. (2) Fe^{+++} iron itself is insoluble in sea water, but can be mobilized by complexing with ligands

produced by the bacterioplankton. (3) *Marine photosynthesis* in surface water bodies is considerably inhibited by ultraviolet rays of sun light. To avoid UV damages, the opportunistic phytoplankton takes a seat in deeps where the UV is adsorbed but some usable rays of spectrum yet remain for photosynthesis. (4) The *El Niño* Southern Oscillation (ENSO) is caused by the temporal extenuation of pacific trade winds. This reverses the East-West direction of equatorial currents eastwards to the cool Peruvian coasts. (5) The cessation of *thermohaline circulation* when the thaw of Greenland ice is setting on could give rise to stop of Gulf stream, which could result a new glaciation like that of Dryas some ten thousand years ago.

Bevezetés

A 20. század második felében bekövetkezett tudományos-technikai fellendüléssel az ökológiai kutatások soha nem látott fejlődése is bekövetkezett. A szárazföldek és édesvizek ökoszisztémáinak ismereteihez képest azonban az oceanográfiában bizonyos lemaradást láthatunk. A 2000. év előtt megjelent kézi-, és tankönyvekben (1,2,3,4) jelentős, részint ellentmondásos problémák maradtak megválaszolatlanul. Ezek a kérdések szinte az olvasó arcába kiáltottak, de legtöbbjük többé-kevésbé korrekt interpretálására csak az utóbbi 15-25 évben kerülhetett sor. Érdeemes tehát egy közleményben a tengerökológia négy fontos, korábban megoldatlan témakörében a tudomány jelenlegi állását bemutatni.

Az óceánok titkos baktérium-, és vírusseregei

A „klasszikus” bakteriológia egyik alapvető törekvése, hogy a vizsgálandó szervezete(ke)t azok élőhelyéből, közegéből (hígítással, szélesztéssel) elkülönítsük, és összetevőit külön-külön kitenyésztve önálló klónokként izolálhassuk. A hígítás vagy a szélesztés műveletei során a közeg egyes élő sejtjes összetevői távol kerülnek egymástól. Ezután a kérdéses mikroorganizmusok (pl. kórokozók) valamilyen mesterséges, legtöbbször agarral kocsonyásított („megszilárdított”) táptalajokon (lemezeken) elkülönülve tenyésztethetővé és vizsgálhatóvá válhatnak. A lemezen egyenként rögzülve, megfelelő inkubációs idő elteltével az odakerült sejtek önmagukat megsokszorozva szabad szemmel jól felismerhető klónokat (telepeket, kolóniákat) képeznek. Utóbbi egységek azonosíthatók, és szerepük tisztázható lesz. A módszert a 19. század végétől Robert Koch, Louis Pasteur

és sokan mások az orvostudomány számára dolgozták ki. Azóta a kérdéses mikroorganizmusok kitenyésztése a mikrobiológia többi ágazatában is alapvető, nélkülözhetetlen vizsgálati eszközzé vált.

A tengerek planktonjában az autotróf mikroorganizmusok (fitoplankton) mellett heterotróf baktériumok is léteznek, agar-lemezekon kitenyészthető telepeik száma azonban – más élőhelyekkel, mint édesvizek, talajok, állati váladékok összehasonlítva – meglepően alacsony. Ennek alapján még az 1980 – 90 körül kiadott tengerbiológiai tankönyvekben (1, 2, 3, 4) is az a vélemény dominált, hogy a tengervízben élő baktériumsejtek mennyisége legfeljebb néhány 100 körül lehet milliliterenként.

Az újabb, modern eszközökkel végzett vizsgálatok alapján azonban megállapították, hogy a tengeri baktériumok valós száma ennek akár ezerszerese, azaz 100'000/ml körüli is lehet, de a termékeny tengerekben az aktív produkciós időszakban elérheti az 1 millió/ml-t is! Hogyan lehetséges, hogy ezt a hatalmas mennyiséget sokáig nem sikerült felfedezni? Úgy, hogy ezen mikroorganizmusok > 99%-a még a legválogatottabb, tengervizes agaros táptalajokon sem „hagyja magát” a klasszikus lemeztechnikával kitenyésztetni. A kevés tenyészthető tengeri baktérium egyike a kolera kórokozójának rokona, a *Vibrio harveyi*, amely különböző tengeri állatokat fertőzhet meg.

A mikroszkópos vizsgálatok azonban már régebben is kimutatták, hogy ennél sokkal több igen apró, a fénymikroszkópok láthatósági határán lévő baktérium-szerű, ámde inaktív(nak látszó) részecske is lebeg a közegben, amelyeknek életjelenségeit sokáig nem sikerült észlelni.

A 20. század vége felé azonban epifluoreszcensz festékekkel sikerült „életre hívni”, láthatóvá és számolhatóvá tenni e titokzatos, 1 mikrométernél is kisebb lényeket. Kiderült, hogy az élő heterotróf tengeri baktériumsejtek száma legalább száz-, vagy több százszorososa a lemeztechnikával telepképzésre bírható baktériumokénak. Ebből az is következik, hogy a tengeri biomaszra leghatalmasabb frakcióját alkotják. Élő mivoltuk igazán „fényes” bizonyítéka, hogy ezek a festékek csak az ATP hasítása következtében villannak fel, de ezt a nukleotidot csak élő sejtek képesek előállítani és hasznosítani.

A továbbra sem tenyésztendő, más utakon dúsított tengeri bakterioplankton vizsgálata során arra is fény derült, hogy az apró szervezetek ugyan prokarióták, egy részük (30 – 50%-ban) azonban nem is az Eubacteria, hanem az Archea („ősbaktériumok”) birodalmába tartozik. Ezek képviselőit, illetve különleges, az „Eubacteria”-tól teljesen eltérő

molekuláris felépítésüket csak 1977-re ismerték fel. Az akkoriban megismert ősbaktériumok mind extremofileknek bizonyultak, azaz csak a Föld legextrémebb, életellenesnek tekintett helyein, mint a tengeri és édesvízi hidrotermális források százfokos vizeiben, a 25 – 30 % sót tartalmazó Holt-tengerben, vagy a föld felszíne alatti olajlelőhelyeken fordulnak elő. Méretük kisebb 1 μm -nél, és táptalajon nem tenyészthetők.

A titokzatos tengeri mikroorganizmusok Archaea-hoz való tartozását főképp nukleinsavuk molekuláris vizsgálata bizonyította. Ezzel a módszerrel De Long és munkatársai (5) már 1994-ben kimutatták, hogy az Antarktiszi Óceán vizének planktonjában a picoplanktoni (az 1 μm alatti) frakció legalább 30%-ban ősbaktériumokból áll.

Ezek az új ismeretek lényegében „fejére állították” a tengeri biomasszáról szerzett eddigi ismereteinket. A tengeri pico-, és mikrop planktont mindenek előtt heterotróf baktériumok alkotják, amelyek a fitoplanktonnal egyetemben az óceánokban élő pelágikus biomassza > 80%-át teszik ki, azaz sokkal többen vannak, mint a zooplankton, a krillek, a halak és a bálnák együttvéve. Gyorsabb ütemben nőnek, mint a nagyobb élőlények. Tömegességüknek köszönhetően meghatározzák az élethez elengedhetetlen anyagok átalakítását és eloszlását, amivel a bolygó éghajlatát is befolyásolják. Tengeri mikrobák nélkül az élet nem létezhetne a mai formájában.

Tengeri vírusok és a „DOC” (Dissolved Organic Carbon)

Ezeket a szigorúan sejtparazita lényeket a 20. sz.-ban, a bakteriológia „hőskora” utáni időkben fedezték fel, miután bizonyos járványok (himlő, influenza) okozói az addigi módszerekkel kimutathatatlanok voltak. Később, a 20. század második felétől az *Escherichia coli* baktérium és vírusainak (bakteriofágjainak) vizsgálatai a molekuláris genetika fényes felfedezéseihez vezettek.

A legfinomabb szűrőkön is áthatoló tengeri vírusokat csak néhány évtizede vizsgálják. Nagy számuk ellenére kevés vírus lehet a halakra, bálnákra vagy az emberekre fertőző kórokozó. Szinte valamennyien tengeri bakteriofágok, amelyek főképp a fitoplanktont alkotó autotróf tengeri eukariotákat, valamint a prokariota cianobaktériumokat, illetve a fent említett titokzatos heterotróf baktérium-tömegeket támadják meg. A tengeri bakteriofágoknak – hasonlóan a többi vírushoz — nincs saját anyagcseréjük, és így képtelenek az önálló szaporodásra – ehhez rájuk érzékeny sejtek szükségesek. A víusrészecske (*virion*)

nukleinsava a gazda megfertőzése után átveszi felette az uralmat, és intracelluláris multiplikációjához a gazdasejt riboszómáit és enzimeit használja fel. Miután a gazdasejt elpusztul és felnyílik, új virionok százai-ezrei kerülnek a közegbe. A vírusok ezáltal komoly hatással vannak a tengeri fitoplankton és bakterioplankton biomasszájára, azok idő-, és térbeli dinamizmusára, és így az ezzel összefüggő globális folyamatokra.

A bakteriofágok által megtámadott (ciano)-baktériumok lebomlása után a belőlük felszabaduló szerves anyagokat („*dissolved organic carbon*” – DOC, azaz „oldott szerves szén”, aminosavak, nukleinsavak stb.) az újabban megismert heterotróf baktériumsereg veszi gondozásba, és mineralizálja, azaz szervesanyagokká (nitrát, foszfát) alakítja át. Ezek aztán újból a részint elpusztított fitoplankton szervezeteinek (kovamoszatok, Dinoflagelláták) nyújtanak tápanyagokat, megtartva a nitrogént, foszfort a felső vízrétegben. A DOC segíti az élet fenntartását az egyébként tápanyagban szegény nyílt óceánokban. Korábban feltételezték, hogy a DOC a fitoplankton primerprodukciónak egy részét képezi, amelyet az azt alkotó sejtek „önként és dalolva” adnának le környezetükbe. A tengeri vírusok megismerésével ez a kissé naiv elképzelés is semmivé lett. Ma már tudjuk, hogy a DOC főképp a vírusok – a bakteriofágok – „gyilkos” tevékenységének következménye

Mai ismereteink szerint a világóceán DOC összmenyisége elképesztően nagy – a Föld szerves széntartalmának kb. 20%-át foglalja magában. Elemi szénben (C) kiszámolt koncentrációja a felszíni vizekben 70 és 100, a mélyebb régiókban 30 $\mu\text{mol Carbon}$, ami kb 1 ill. 0,3 ppb -nek felel meg.

Egy további, a tengeri baktériumokhoz kapcsolódó fogalom a „POC” azaz a „*particular organic carbon*”. Ezen részecskék mérete túlhaladja a makromolekulák nagyságát. Ennek legismertebb formája a tengeri hó, amely főképp a kocsonyás makro-zooplankton (medúzák, szalpák) maradványaiból áll elő. Tápértéke keletkezése idején alacsony, de az anyag az idő során zsugorodik, ezáltal gazdagodik, és szürkés színt vesz fel a felületén megtelepedett baktériumok miatt. A tengeri hót (havat) lassú süllyedése során részben elfogyasztják a mélyebben lebegő planktoni szervezetek, de egy része elérheti akár a mélytengeri árkokat is, és táplálékul szolgálhat az ottani fogyasztóknak. Mivel a pelyheket rövid időn belül átjárják és beborítják a baktériumok tömegei, kívánatosabbá válnak a mikrofogyasztók számára.

A vas központi szerepe a tengerek tápanyag-forgalmában

A tengervízben modern analitikai módszerekkel kimutatható a periódusos rendszer elemeinek legalább két-harmada Ezek némelyike akár hihetetlenül alacsony koncentrációban is meghatározható, de néhány tucat elem mennyisége mindmáig a kimutatási határ alatt marad.

Tengeri tápanyagok. A szárazföldi ökoszisztémákban (erdők, szavannák, mezőgazdaság) mindeddig több mint egy tucat létfontosságú elemet ismertünk fel. Ezeket nevezzük tápanyagoknak, mert hiányukban Liebig minimumtörvénye értelmében a fotoszintézis lelassul, ill. leáll (N, P, K, Mg, Ca, Zn, Fe és további nyomelemek.). A tengerekben – a szárazföldekkel ellentétben – csak 4 elem tekinthető tápanyagnak: a N, P, Si és Fe. De miért nem tekinthető tengeri tápanyagnak pl. a K, a Ca vagy a Mg? Nem lenne rájuk szükség? Dehogynem, de az óceánokban ezek az elemek az élőlények által felvehető mennyiség sokszorosában vannak mindig jelen, és így hiányuk sohasem következhet be.

A négy tengeri tápanyag felszíni koncentrációja a termőtalajokhoz képest hihetetlenül alacsony, azok < 1 ezreléke, azaz néhány száz ppb körüli vagy ez alatti (pl. a N, a P) -- mivel a fitoplankton kimondottan „éhezik” rájuk és folyamatosan felveszi őket. A mélyebb vízrétegekben viszont ezek a tápanyagok a fotoszintézis hiányában felhalmozódnak, így ahol a mélységi vizek a felszínre jutnak, ott a tenger produktivitása magas („*upwellings*”).

De az óceánokban is lehetnek a liebigi minimumszabály értelmében vett minimumfaktorok. Ez legtöbbször a vas (Fe), ritkábban a P, N vagy a Si. A 20. századi felfogásban a vas az óceáni rendszereken belül nehezen újul meg (alig reciklizálódik), mivel a tengervízben egyedül megmaradó formája, az Fe⁺⁺⁺ „ion” oldhatósága magában szinte nulla. A primerprodukciónéha meglepő alacsonyosságát (pl. az egyenlítői óceáni upwellings területén) elsősorban a vas hiányára vezették vissza, míg a N és P mennyisége a mérések szerint a kb. 150 m mélyből feláramló vízben elegendő mennyiségben lenne jelen. A vas hiánya a szárazföldektől távolabbra általánosabb, és így produktivitás gátló. – A „Déli Óceánt” ugyan termékenynek ismerjük, de elegendő vas jelenlétében a primerprodukción értéke magasabb is lehetne az aktuálisan mért értéknél.

A tengerökológia egyik legősibb problémája tehát az volt, hogy a minden élőlény számára létfontosságú vas (Fe) laboratóriumi kísérletekben, a tengervízben teljesen oldhatatlannak bizonyult, de a természetes tengervízben ennek ellenére valamiféle

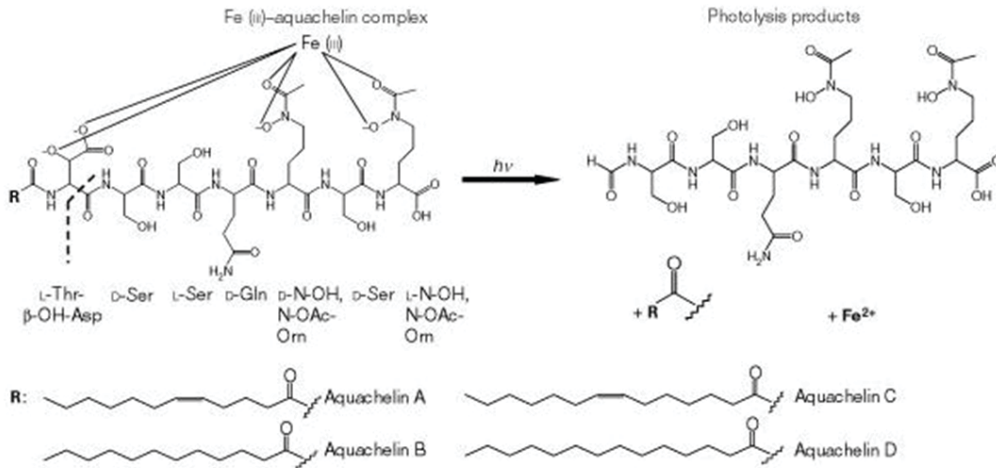
jelenléte mégis kimutatható. A tápláléklánc elején, azaz már a fitoplankton sejtjeiben viszont máris mérhető mennyiségű, a közeghez képest több százszorosan magasabb koncentrációjú intracelluláris vas halmozódik fel „szinte a semmiből”, mivel a közegben a szerves vas oldódása lehetetlennek tűnik. A laborkísérletek szerint a vas tenger-vízben egyedül megmaradó formája, az Fe^{+++} oldhatósága ebben a közegben, 8 körüli pH-nál nem mutatható ki.

A probléma megoldása szorosan kötődik egy másik, a 20. század végéig tévesen magyarázott rejtélyhez, a tengeri bakterioplanktonhoz. Néhány éve még úgy vélték, hogy a tengerekben a vas nem reciklizálódik, ezért legnagyobb részének állandóan a szárazföld felől kell oda bekerülnie. Nagy szerepe van ebben a szeleknek, amelyek sivatagok felől különösen sok vasat juttatnak az óceánokba. Pl. a Golf-áramlat a Szahara, a Csendes óceán az ázsiai szárazföld felől jut vaspótláshoz. Az újabb kutatások szerint a különböző hidrotermális forrásokból is jelentős vasmennyiségek kerülhetnek a felületi vizekbe, ahol látványos „vízvirágzást” idéznek elő (9).

Akárhogy is kerül a tengerbe, a vas a laboratóriumi kísérletek szerint azonnal ki kellene csapódnia, azaz Fe^{+++} (Fe_2O_3 , rozsdá) alakba menne át, amely a fitoplankton, minden tengeri élet alapja, számára nem is lenne felvehető. De a probléma minden abszurditása ellenére e fontos elemnek valahogyan mégis jelen kell lennie az óceánokban, mert nélküle az élet nem lenne lehetséges. A 20. század végétől kezdve megtudhattuk, hogy a tenger-vízben oldhatatlan vasoxidot mindenekelőtt a rendszer „nyakas”, nem tenyésztethető heterotróf baktériumai viszik oldott formába. Az általuk termelt sziderofór (vas-hordozó) vegyületek (pl. *aquachelin* típusú *ligandumok*) komplex formában kötik meg, és tartják oldott formában a kevés kicsapódott vasat. Ezek a bonyolult szerves molekulák az F_3^{+++} „ionokat” megkötni képes vegyületek legerősebbjei közé tartoznak (1. ábra). Ezeket a komplex vasvegyületeket a fitoplankton már képes felvenni, és a fotolízis folyamatában hasznosítható Fe^{++} formára változtatni (8, 10, 11).

A szárazföldi ökoszisztémákban, pl. a talajokban vagy a mezőgazdaságban már régebben ismertek voltak ilyen biológiai eredetű molekulák, amelyek lehetővé teszik a vas felvételét a növények számára. A természetes tenger-vízben kb. 1 ppb-s nagyságrendben kimutatható vas szinte teljesen ebben a bakterioplankton által termelt ligandumokhoz kötött komplex formában van jelen (8). A Fe^{+++} ion ezen molekulákon „lovagolva” már be képes lépni a fitoplankton sejtjeibe, ahol fotolízis segítségével (1.ábra) biokémiailag felhasználható Fe^{++} formába megy át.

1. ábra: Vastartalmú aquachelin típusú ligandumok a tengervízben, és fotolízisük a fitoplanktonban (a Wikipedia nyomán) (8)



A fitoplankton esete az ibolyántúli fényrel

A fitoplankton a tengerekben szabadon sodródó klorofilltartalmú egysejtű élőlények (prokarióták és eukarióták, néha pongyola megnevezéssel „algák”) összessége, amelyek a klorofill segítségével, napfényenergia felhasználásával széndioxidból és vízből megújuló szerves anyagot állítanak elő. Az így termelt anyag a táplálékláncon ill. hálózaton keresztül jut el a magasabb trófikus szintekig (fogyasztókig).

A szárazföldeken a planktoni életforma hiányzik, a biomok fő primerproducensei a nagy, edényes növények (főképp nyitvatermő fák a zordabb tájakon /tajga/, vagy főképp zárvatermő fanerofitonok és gramineák a mérsékelt, szubtrópusi és trópusi biomokban). Az ezekre épülő fogyasztói táplálékhálózatok általában rövidebbek, gyakran nagy növényevőkkel kezdődnek (pl. legelők, afrikai szavannák) és 1 – 2 másodlagos fogyasztói lépcsővel (ragadozók, dögevők) fejeződnek be. Az erdőkben a primerprodukciónak jelentős részét nem is a magasabb rendű fogyasztók lélegzik el, hanem a termék mindjárt mikro-fogyasztók (*scavengers*) révén mineralizálódik. Az erdei primerprodukciónak lebontásában ezt a lépést (mineralizáció) gombák, hangyák, gombák és baktériumok végzik. A szárazföldi ökoszisztémák összprodukcója többszöröse is lehet a tengeriekének.

Az óceánokban a tápláléklánccokat bizonyos tekintetben fordított rend jellemzi: a fő termelők nem a nagy makromozgatók (habár a dús parti moszaterdőket nézve az lehet az érzésünk) hanem a víztestben szabadon lebegő fitoplankton mikroszkópos képviselői, „élükön” a cianobaktériumokkal, kovamoszatokkal és dinoflagellátákkal. A tápláléklánc gyakran hosszú, 4 – 5 lépcsős is lehet. A mineralizációt főképp a különös, újabban megismert heterotróf bakterioplankton képviselői fejezik be.

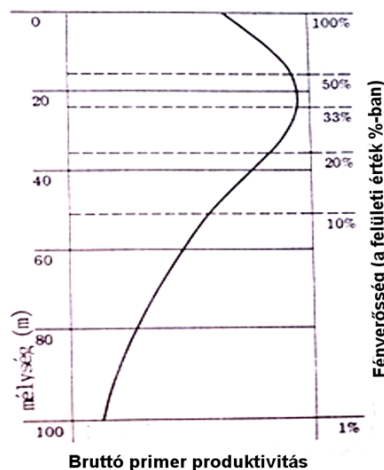
Régi ökológiai példázat: A tengerekben 1'000 kg fitoplanktoni termelésre 100 kg elsődleges fogyasztó épül (pl. Copepoda rákokcsák). Ezeknek anyagából elfogyasztásuk esetén 10 kg „új” (pl. szardínia)- szövet jöhet létre, amely egy ragadozó halban 1 kg (ton)-halhúst eredményez. Az utóbbit elfogyasztva a csúcsragadozó *Homo sapiens* testében 0.1 kg új szövet képződik. A szárazföldeken viszont a mezők növényeiből 1'000 kg-ot fogyasztva 100 kg marha, juh, stb. hús is képződhet.

Logikusnak tűnik, hogy a fitoplankton legmagasabb produktivitását a víztest felszín-közeli rétegeiben érné el, hiszen itt vehetné fel a maximális fényenergiát. Azonban régóta ismert tény, hogy a vízi primerprodukciónak maximumát nem itt, hanem a mélyebb, fényben szegényebb rétegekben éri el (12) (STEEMAN-NIELSEN, 1963). Akkoriban ezt a jelenséget sokáig a fitoplanktoni szervezetek különböző „fényérzékenységgel” magyarázták, míg a fény spektrum egyes összetevőinek hatását kevesen vizsgálták.

A napfény spektrumának vizsgálatból azonban kitűnik, hogy jelentős részét az emberi szemmel láthatatlan ultraibolya (UV) sugárzás alkotja, amely a vízben több mélységig lehatol. E sugarak károsító hatásáról már az elemi iskolában is hallhattunk. A sejtromboló hatás ellen egyes szárazföldi lények naptejgel (ember, víziló), mások ellenálló kültakaróval, külső vázzal védik magukat. Mégis viszonylag új fejlemény, hogy a fitoplanktoni produkció optimális mélysége nem a szereplők valami mitikus fényérzékenységében keresendő, hanem az UV-sugárzás függvénye. A 20. században ezt még csak „sejtették”, és a jelenséget inkább a fitoplanktoni szervezetek különböző fényérzékenységgel magyarázták. A fitoplankton dilemmája tehát az, hogy abban a vízmélységben tartózkodjon, ahol a sejtkárosító ultraibolya (UV) sugarak nagy része kiszűrődik a közegből, míg a spektrum látható, nem káros sugarainak fényerőssége még elégséges a fotoszintézishez (2. ábra).

2. ábra: A fitoplanktoni produkció maximumának alakulása a mélység függvényében (Steeman-Nielsen nyomán)

A tengeri bruttó primerprodukció változása és a produkciós maximum létrejötte az optimális (kb. 16-es) mélységben, tiszta, meleg tengerekben (Steeman-Nielsen 1963 nyomán).



A fitoplankton vertikális vándorlása a nappali órákra korlátozódik, és fő „motivációja” egy bizonyos, optimális fényerősségű vízréteg megtalálása. Ebben a rétegben a Nap látható sugarai még többé-kevésbé elegendő energiát szolgáltatnak a fotoszintézishez, de a sejtkárosító UV sugárzás már az „elviselhető” szintre csökken a vízben való abszorpciója miatt. Ezt a jelenséget az édesvízi planktonnál is vizsgálták (PÁLFFY, 2010). Utóbbi mű szerzője kiemeli a „mycosporin-szerű aminosavak” UV-abszorbeáló tulajdonságait. Ezek a molekulák a sejtek külső citoplazma-rétegében helyezkednek el, és képesek a káros UV-sugarak abszorbeálására, amivel megvédik a sejtmag DNS-ét.

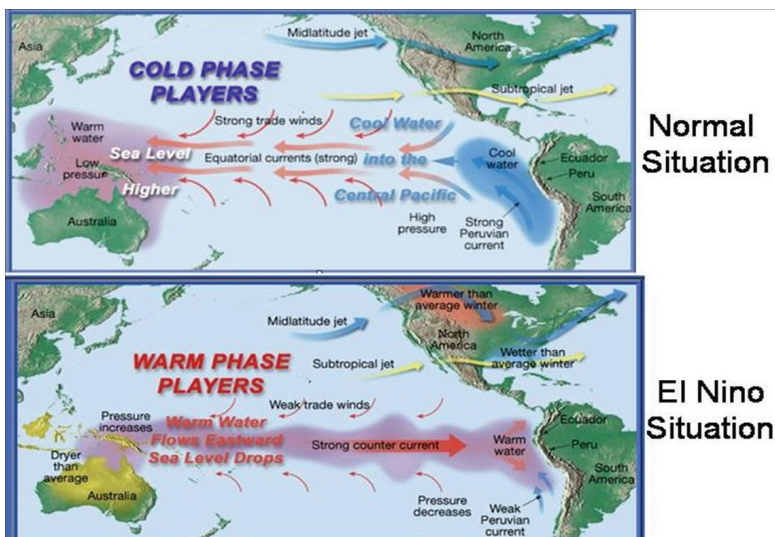
Az El Niño jelenség

Mi is az újabban oly sokat emlegetett El Niño jelenség? Nevét onnan kapta, hogy a velejáró bajok karácsony táján kezdődnek, azokban a napokban, amikor kb. 2000 éve az a bizonyos kisfiú – el niño, azaz Jézus Krisztus – született. „ENSO” rövidítéssel is szoktak róla írni (*El Niño Southern Oscillation*) amely kiszámíthatatlan, oszcilláló megjelenésére utal (15). Hatására 3-5 évenként sok hónapos esőzések öntik el Peru egyenlítőhöz közelebb eső sivatagos óceáni partjait. Ezen a vidéken, pl. Chiclayo és Trujillo városok tájain, az itt élők az Andok patakjaival több ezer éve termékeny öntözéses mezőgazdasági művelést folytatnak. Ha rájuk tör a szeszélyes kisfiú, felborul a több éves nyugodt termelő élet.

Lecsengése után az újjáépített infrastruktúra is csak néhány évig, az El Niño következő rohamáig működik. Jelenleg épp véget ért a múlt évi csapás. „Évtizedek óta nem volt ilyen erős a rettegett El Niño” írja a hvg.hu a legutóbbi, 2016-os eseményről, amely olyan erővel zúdult a partvidékre, hogy a délre fekvő Lima városát is elérte, ami különben ritkaság. A jelenség nem csak Perut érinti, hanem közvetve az egész világra kihat. Hvg.hu: „Véget ért az utóbbi két évtized legerősebb, Ázsiában termés kiesést és élelmiszerhiányt okozó El Niño légköri jelensége - jelentette be az ausztrál meteorológiai intézet”.

Ez a meteorológiai sorscsapás két meleg, nyugati irányba haladó Csendes-óceáni áramlás, azaz az északi és a déli egyenlítői tengeráramlat, és őket mozgató passzátszelek kölcsönhatásának következménye. „Normális években” (amikor nincs El Niño) a passzátszelek által mozgatott északi és déli egyenlítői áramlatok egyenletesen nyugati irányba haladnak. A Coriolis-erők hatására az elhajtott víztömegek pótlásaként a Csendes óceán chilei-perui partszakaszán a Humboldt-áramlat (=„Peruvian Current”) hűvös, tápanyagokban dús mélységi vizet „húz” fel és továbbít a déli egyenlítői áramlattal nyugat felé. A „menet” egészen az indo-ausztráliai térségig tart, ahol az áramlat az ottani szárazföldeken megreked (3. ábra). Az állandó beáramlás hatására a tenger szintje több millió négyzetkilométeren 50 cm-rel is magasabbra „púpозódik” fel az elvárt szinthez képest.

3. ábra: Az El Niño előtti években nagy mennyiségű meleg tengervíz halmozódik fel a Csendes-óceán nyugati medencéjében, amely később a passzátszelek gyengülésével a Csendes-óceánon kelet felé átáramolva eléri a perui partokat (a Wikipedia ábrája)



Semmi sem tart örökké, mindez addig működik, amíg a folyamatosan nyomuló passzátzelek ereje kitart. Ha megfogyatkozik vagy akár le is áll ez az erő, akkor a K-Ny irányú egyenlítői áramlások csökkenésével a gravitáció ereje érvényesül, és így a megduzzadt meleg trópusi vizek az egyenlítői ellenáramlattal keletre, a perui partok felé sodródnak. A több hónapig utazó víztömeg meleg, párás levegője végül nekiütközik az Andok hűvös hegláncának, és özönvízserű esőzéseket bocsát a különben évekig sivatagos, ámde öntözéssel intenzíven művelt tájra.

A partközeli vizekben a Humboldt-áramlat által „felhúzott” hűvös mélységi víz magas tápanyagtartalma miatt, hatalmas planktoni primerproduktót tesz lehetővé. Ennek következtében a halászat teljesítménye „normális években” itt a legmagasabb: 1971-ben a világ haltermelésének 20%-a innen származott (13 millió tonna szardella). Ha beáll az El Niño, a Humboldt-áramlat is lelassul, a feláramlás megszűnik. A halászat is összeomlik, de a passzátzelek újbóli megerősödésével egy éven belül regenerálódik.

4. ábra: El Niño terror 1997: pusztítás Peru ÉNy-i partvidékén (a Wikipedia ábrája)



Az El Niño „terrorja” már több ezer éve tart, és mélyen rányomta bélyegét a korábbi, Kolumbusz előtt ezen a partvidéken élt népek életére is. Az 1987 óta folyó feltárások előtt szinte teljesen ismeretlen *moche* (*mochika*) civilizáció Kr.u. 300 és 900 között, tehát jóval az inkák kora előtt virágzott ezen a partvidéken. A régészeti leletek azt mutatják, hogy öntözéses gazdálkodást folytattak, de nekik is állandóan meggyűlt a bajuk az időjárással.

A károk elhárítására a mochék kegyetlen emberáldozatokat mutattak be a „lefejező” Ai Apaec, a hegyek haragvó istenének megbékéltetésére. E célból nem elfogott

ellenségeiket áldozták fel, hanem saját harcosaikat készítették egymás közötti fegyveres viadalra a nemrég feltárt Huaca de la Luna, a Hold szentélye hatalmas épületének tetőzetén. A vesztes harcosokat megölték, vérüket a főpap felajánlotta a hegyek istenének. Mivel a mochéknak írásuk nem volt, mindezt a néhány éve Trujillo közelében feltárt királyi sírok edényeinek ábráiból következtették ki (5. ábra).

5. ábra: El Niño terror 1700 éve, a IV. századi Peruban: a hegyek haragvó istenét (Ayapecet, „a lefejezőt”, az El Niño feltételezett okozóját) csak embervérrel lehetett kiengesztelni. (foto szerzők, 2012 okt.)



O. F. Ilona leírása: A Huaca de la Luna (a Hold szentélye) épületében 3 szint „plataforma”/ különül el. Az alapja 300 x 210 m, az építmények aszimmetrikusak. A legfelső szinten volt a harcosok küzdőtere. A szertartások során a veszteseket feláldozták. A küzdőtér oldalfalait színes festett képsorok, vallási jelképek díszítették. A tér alatt festett falú folyosón jutottunk el az áldozatoknak szántak terembe. A falakon jaguárfej és kígyók keveréke, fantáziaképek, fehér alapon terrakotta, fekete vonalakkal bevészt képek, jaguárfogakkal, polipkarokkal díszített fejek láthatók egy rombusz alakú keretben.

A sírkamrák is díszesek. A Huaca de la Luna északi oldalán helyezkedik el a nagy ceremóniák tere, gigantikus méretű falakkal körülvéve /175 x 90m/. Valószínű ez az öreg templommal együtt a piramis legrégebbi része. A szertartások részletei a falakon láthatóak. A „Hegyek Istene” (*Aiapaec, a decapitador, Dios Degollador*) a lefejező főisten vért kívánt, hogy megenyhüljön a haragja. Az emberáldozat kiválasztottjai a vesztes harcosok közül kerültek ki. A szent Péter kaktusza levélvel elkábították az embereket, fejbe vágták őket, majd lefejezték és a vérüket felfogták áldozatul a hegyek ősi istenének (6=7. ábra).

6. ábra: Fenn táncoló papok, alattuk győztes moche harcosok festett reliefje a Hold Szentélye (Huaca de la Luna) falán. A sivatagi öntözéses mezőgazdaságra alapozott moche civilizáció az 1987 óta folyó feltárások előtt szinte ismeretlen volt (foto szerzők, 2012 okt.)



7. ábra: Legyőzött, megkötözött, feláldozandó moche harcosok festett reliefje ugyanott (foto szerzők, 2012 okt.)



A sötét mélységek titokzatos óceáni szállítószalagja

A Föld 3 óceánjában két északi, és három déli elliptikus-félkörös felszíni áramlatrendszer alakult ki, amelyek fenntartó ereje a passzátszelek által K-Ny-i irányba hajtott északi, ill. déli egyenlítői áramlatok. Ezek legismertebbje az Atlanti-óceán északi felét átszelő Golf-áramlat, amely a Mexikói öbölből indul el az oda beáramló É-atlanti egyenlítői áramlat tolóereje hatására. Szemben a másik négy fő, szabályos félkörös pályát leíró áramlatrendszerrel, a Golf-áramlat meleg trópusi eredetű vize néhány ezer km megtétele után, az európai kontinens előtt kettéválik. Egyik fele szabályosan DK felé, azaz Afrika irányába fordul el, és visszatér az északi atlanti egyenlítői áramlatba, a másik viszont ÉK-É irányba tér el, és sok száz km-en át különleges, enyhítő hatást gyakorol az általa érintett part-menti szárazföldekre, egészen Izland és É-Norvégia partjaiig.

Miért fordul a Golf-áramlat egy része ÉK-É felé? Az európai szárazföld kényszeríti erre? És hova tűnik el útja végén? Sokáig úgy gondolták, hogy a Golf-áramlat északi ágának lehülő vize útja végén szétfoszlik, lesüllyed és eltűnik az Északi Jeges-tenger világában. Kiderült azonban, hogy ez az elképzelés túl egyszerű. A 20. század vége felé kimutatták, hogy a Golf áramlat lehülő, párolgással besűrűsödő ágának víztömegei egy tömbben maradva Grönland és Izland között lesüllyednek az északi Atlanti-óceán kevésbé sűrű felszín alá (16) (BROECKE, 2010). Ez a mélységi áramlat a közép-atlanti hátság és az amerikai kontinens között, É-, és D-Amerika partvonala mentén, az óceáni aljzaton több 1000 m mélységben, kb. 5 km/h sebességgel folytatja útját az Antarktisz felé. A lesüllyedő víztömeget követni lehetett a légköri atombomba-kísérletekből származó radioaktív anyagok mérésével. Az 1960 – 70-es években végzett kutatások során meg is fejtették a “titkot”: a hidrogén béta-sugárzó izotópját, a tríciumot (^3H) az óceánok vizében általában csak 100 – 400 m-ig lehetett kimutatni ki, de a Golf-áramlat északi végénél, ahol a lehülő víz besűrűsödik, akár 3'000 m-ig is lehatol a trícium eredetű radioaktivitás. Ez a felszíni víztömegek konvergenciájára utal.

A Golf-áramlat északi ágát tulajdonképpen az odaáramló víz állandó lehülése, és a lesüllyedő tengervíz-tömegek „szívó hatása” tartja állandó mozgásban. Ha ez a „szívó” hatás megszűnne, a Golf-áramlat északi ága leállna, és az északi félteke ismét eljegesedne. A Tokyoi egyetemen ezt a modellt szupercomputerekkel szimulálták; a lesüllyedő grönlandi víz 3 – 4'000 m mélyen 100 km széles felszín alatti mélytengeri áramlatot hoz létre, amely É-Amerika, majd D-Amerika partjait követve halad az Antarktisz felé. Itt újabb hidegvíz-adagot kapva K felé halad; egy ága az Indiai-óceánba tart, a másik Új-zéland után eléri a 10'000 m mély Kermadec-árkot, ahol “meggyülemlik”, kitölti azt,

majd keveredve a felszíni meleg vízzel felemelkedik az Indiai és a Csendes-óceán trópusi vizei alá. Innen, több 100 méterrel a felszíni áramlatok alatt visszafelé haladva, sok ezer km út megtétele és kb. 1000 év után visszatér kiindulási helyére, a grönlandi vizekbe. Így tehát jogosan beszélhetünk egy *óceáni szállítószalagról, azaz termohalin cirkulációról.*

Hogy a Föld bolygóra milyen könnyen visszatérhet az eljegesedés, azt a „Dryas” nevű kis jégkorszak példázza. Az utolsó nagy jégkor, a Wisconsin (Európában Würm) végi olvadás vize Észak-Amerika területén egy hatalmas tórendszerben gyűlt fel, amely nem tudott kelet felé addig lefolyni, amíg át nem szakította az északkeleti, a mai Kanada Quebec tartományában felhalmozódott, lassabban olvadó nagy tömegű jéggátat. Ennek kb. tízezer éve létrejött áttörésével a kiszabaduló édesvíz hihetetlen gyorsasággal elárasztotta az Atlanti-óceánnak azt a részét (is), ahol a Golf-áram lehűlő vize a jégkor után elkezdett újra lesüllyedni. Ennek következtében – az olvadás hatására! – kb. 10'000 éve még egy további, „csak” kb. egyezer évig tartó kis, a sarkvidéki „Dryas” növénykéről elnevezett „mini” jégkorszak következett be. Ezt bizonyítottan a termohalin vízcirkuláció váratlan leállása váltotta ki.

10'000 évvel később – manapság – a klíma a jégkorszakokhoz képest viszonylag stabilisnak mondható. Akkor tehát minden rendben van? Ma még működik az óceáni szállítószalag, de fennmaradását veszély fenyegeti. A globális felmelegedés folyamánként egyre több jéghegy szakad le Grönlandról (1970: évi 400, ma több mint 1'000). A jéghegyek tömeges leszakadásával és jegük elolvadásával felhígulhat az Északi Jeges-tenger, és a Golf-áram északon lebukó ága is. Ehhez hozzájárulhat, hogy a felmelegedéssel a trópusokról egyre több vízpára kerül az atmoszférába, amely szintén hozzájárulhat a Jeges-tenger vízének hígulásához. Talán nem is felmelegedés, hanem hosszú távú lehűlés lenne várható a CO₂ és metán okozta átmeneti hőmérséklet emelkedés következménye? Ez a gondolat már nem csak bulvár-szinten bukkan fel újra meg újra a médiumokban.

Felhasznált irodalom

- Tardent, P. 1993. Meeresbiologie. Eine Einführung. 2. neubearbeitete und erweiterte Auflage. Georg Thieme Verlag, Stuttgart.
- Nybakken, J. W. 1988. Marine Ecology. An Ecological Approach. Harper and Row, Publishers.

- Ott, J. Meereskunde. 1988. Einführung in die Geographie und Biologie der Ozeane. Verlag Eugene Ulmer, Stuttgart.
- Regős, J. 1996. Bevezetés a tengerökológiába. Egyetemi jegyzet, Eszterházy Károly tanárképző főiskola, Eger.
- Regős, J. 2005-2017. Tengerökológiai gyakorlatok. Digitalizált kézirat egyetemi hallgatók számára, személyes kérésre átmásolható.
- Gunkel, W. 1990. Bakterien. In: Lozán et al.: Warnsignale aus der Nordsee. Paul Parey Verlag, Berlin und Hamburg
- De Long et al. 1994. High Abundance of Archaea in Antarctic Marine Picoplankton. *Nature* 371, 695-697
- K. Barbeau, E. L. Rue, K. W. Bruland & A. Butler. 2001. Photochemical cycling of iron in the surface ocean mediated by microbial iron(III)-binding ligands. *Nature* 413, 409-413 (27 September 2001)
- Stéphane Blain et al. (41 coauthors). 2007. Effect of natural iron fertilization on carbon sequestration in the Southern Ocean. *Nature* 446, 1070-1074
- Laura Poppick, Staff Writer. 2013. Huge Iron-Rich Plume Discovered Beneath Atlantic Ocean. *Livescience.com* Staff Writer / August 20, 2013
- P. W. Boyd M. J. Ellwood. 2010. The biogeochemical cycle of iron in the ocean. *Nature Geoscience* 3, 675–682
- Steeman-Nielsen. 1963. Production, Definition and Measurement. In: M.N. Hill (editor). *The Sea*, vol. 2. John Wiley & Sons. Inc
- Häder, D.-P., Helbling, E. W., Williamson, C.E. and Worrest 2011. Effects of UV radiation on aquatic ecosystems and interactions with climate change. *Photochem. Photobiol. Sci.* 10, 242-260
- Pálffy Károly. 2010. Az ultraibolya sugárzás hatása mikroalgák szaporodására, pigmentösszetételére és hormontartalmára Mosonmagyóvár, Doktori iskola 2010
- Wallace Smith Broecker 2010. *The Great Ocean Conveyor, Discovering the Trigger for Abrupt Climate Change*, Princeton University Press.
- El Niño. A Wikipédiából, a szabad enciklopédiából
- Planet Ocean: The Stream in the Dark 2004 Discovery Chanel TV