

A KLÍMAVÁLTOZÁS OKOZZA-E A TENGERI MÉSZVÁZÚ ÉLŐLÉNYEK KIPUSZTULÁSÁT?

DOES THE CLIMATIC CHANGE CAUSE THE EXTINTIONS OF CALCIFEROUS CREATURES?

Juvancz Zoltán, Biczó Imre

Óbudai Egyetem, Rejtő Sándor Könnyűipari és Környezetmérnöki Kar,
Környezetmérnöki Intézet, 1034 Budapest, Doberdó út 6., juvancz.zoltan@rkk.uni-obuda.hu, [biczo.imre@rkk.uni-obuda.hu](mailto:biczó.imre@rkk.uni-obuda.hu)

Összefoglalás. A cikk a légkör megnövekedett szén-dioxid tartalmának lehetséges hatását vizsgálja a tenger mészvázú élővilágára. Az antropogén hatások miatt megnövekedett szén-dioxid kibocsájtás egyharmadát a tengerek vették fel, ezért a tengerek vize az óceánok puffer hatása miatt csak csekély mértékben, 0,1 pH értékkel lett savasabb. Ez a savasodás azonban a felszín közelében nem okoz *telítetlenséget* a szilárd karbonátra. Azaz nem várható az élő mészvázúak feloldódása a belátható jövőben. Ráadásul a mészvázképződés biológiailag kontrolált, amit csak csekély mértékben befolyásol a tengerek jelenlegi és a reálisan várható savasodása. Az írás több szempontot is vizsgál (pl. a fotoszintetizáló élőlények megnövekedett biológiai aktivitását, a mélység hatását a szilárd karbonát oldékonyságára, a karbonátképződés pH függését stb.). A cikk célja, hogy felhívja a figyelmet arra, hogy reálisan nem várható az élő tengeri mészvázúak feloldódása annak ellenére, hogy a légkör megnövekedett széndioxid tartalma más oldalról súlyos problémákat okoz.

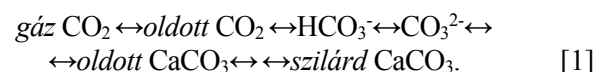
Abstract. This paper examines the effects of the increased carbon dioxide level of atmosphere on the oceanic crustaceous creatures. One third of the increased anthropogenic carbon dioxide emissions have been absorbed by the oceans, which caused its acidification with 0.1 pH value. The enormous buffer capacity of oceans is the reason of this slight shift of pH value. This mild increased acidification do not cause unsaturated state for solid carbonate, therefore the dissolution of carbonate structure of living crustaceous creatures cannot be expected within foreseeable time. The building processes of carbonate structures are biological controlled, in this way the expected acidifications of oceans do not disturb these progresses significantly. The paper is discussing other aspects too (e.g. increased biological activity of photosynthesizing creatures, effects of depth of oceans on the carbonate dissolution and role of the pH in the carbonate chemistry etc.). The aim of this paper is to draw the attention to that, the elevated carbon dioxide emission causes serious difficulties, but the dissolution of living crustaceous creatures cannot be expected among the realistically estimated circumstances.

A klímaváltozás számos súlyos problémát vet fel, amire az emberiségnek fel kell készülni. Több írásban, nyilatkozatban azzal riogatnak, hogy a légkör megemelkedett szén-dioxid tartalma a mészvázak élőlények kipusztulását fogja okozni (O'Neill, 2017; Bednarsek, 2014; Wittman, 2013; Kolbert, 2011). Szerintük a megemelkedett széndioxid koncentráció a tengervizet telítetlenné teszi a kalcium-karbonátra, ami a mészvázak feloldódását és az élőlények gátolt mészvázképződését okozza, élő állapotukban. Azonban a téma alaposabb tanulmányozása után az a következtetésünk, hogy a jelen és a közeljövőben várható körülmények között a mészvázak feloldódása nem várható a légkör megemelkedett szén-dioxid tartalma miatt. Ez összhangban van a témában született számos tudományos cikk álláspontjával, bár az is kétségtelen tény, hogy vannak olyan szakirodalmi közlések, amelyek ellentétesek e cikk és a többségi álláspontot képviselő más szerzők megállapításaival.

A cikk nem közvetlenül légköri jelenséggel foglalkozik, hanem a légköri változások jelentős lehetséges következményével. A tengerek állapotváltozása magával hozhat az egész földet érintő biológiai változásokat, így a légkörrel foglalkozó szakembernek is fontos tudni a légköri változások várható hatását.

Az ismert tény, hogy a légkör szén-dioxid tartalma jelentősen, 320 ppm-ről 400 ppm fölé emelkedett az ipari forradalom kezdete óta napjainkig. A légkörbe jutott széndioxid megközelítőleg egyharmada beoldódott az óceánba, ami annak a savasodását eredményezte.

A tengervízben a gáz állapotú szén-dioxid (gáz CO_2) beoldódik (oldott CaCO_3). Itt vízzel érintkezve és vízzel egyesülve egy negatív töltéssel rendelkező hidrogén-karbonát ion (HCO_3^-) keletkezik. A hidrogén-karbonát hidrogén iont veszítve átalakulhat két negatív töltéssel rendelkező karbonát ionná (CO_3^{2-}). A karbonát ion a tengervízben kalcium ionokkal érintkezve egyesülhet semleges kalcium karbonát molekulává (oldott CaCO_3). A kalcium karbonátnak csekély a vízoldhatósága (0,014 g/l), ezért a vízoldhatóság fölötti koncentráció tengervízből szilárd alakban kicsapódhat. A reakció-sort az [1] mutatja.



Mindegyik átalakulás megfordítható és az egyensúlyok eltolódása több paramétertől függ, többek között a tenger savassági állapotától. A savasságot pH értékkel mérjük, azaz híg vizes oldatokban a pH egyenlő a hidrogénion-koncentráció tízes alapú negatív logaritmusával. Ez azt

jelenti, hogy a pH 1 egységnyi csökkenése a hidrogénion koncentráció tízszeres növekedésével egyenlő.

A tengervíz különböző karbonát ionjainak koncentrációja a következő módon függ a tengervíz pH-jától:

$$[\text{CO}_3^{2-}] = K_2 K_1 K_{\text{Sp-CO}_2} P_{\text{CO}_2} / [\text{H}^+]^2 \quad [2]$$

Ahol a K_1 és K_2 az egyensúlyi együttható a különböző karbonát formák között, a $K_{\text{Sp-CO}_2}$ a szén-dioxid oldékonysága, P_{CO_2} a szén-dioxid gáz parciális nyomása a tengervízben (White, 2013). A leggyakrabban bemutatott összefüggés a karbonát ionformák koncentrációja és a pH között az 1. ábrán látható.

Az 1. ábra a relatív koncentrációkat mutatja zárt rendszerben. Azonban a tenger savasodása a bevitt extra szén-dioxid miatt történik. Az [1] értelmében a karbonát ion koncentrációja egyenes arányban nő a szén-dioxid parciális nyomásával állandó hőmérsékleten, de a pH csökkenésével négyzetesen csökken. Ez a valós körülmények között a karbonát ion koncentráció csökkenését okozza, de nem olyan fokozott mértékben, ahogy az 1. ábra sejteti, amint azt a 2. ábra is szemlélteti. Az 1. ábrán ugyanis a szén mennyisége állandó. A valós életben azonban a pH csökkenést a bevitt plusz mennyiségű szén-dioxid okozza, azaz a P_{CO_2} megnő, mivel a P_{CO_2} egyenes arányban van a karbonát ion koncentrációval, és ez valamennyire csökkenti a pH hatást.

Mint a 2. ábráról látható, a szén-dioxid nyomásának további emelkedése egy bizonyos határ felett már nem eredményez jelentős karbonát ion csökkenést.

Kétségtelen tény, hogy a föld atmoszférájának szén-dioxid tartalma az ipari forradalom kezdete óta megközelítőleg másfélszeresére nőtt (IPCC, 2013), de a felszíni tengervízben a savasság csak egy negyedével, ami egy tized pH változásnak felel meg. A különbség egyrészt az atmoszférának az óceánokhoz képest sokkal kisebb tömegével magyarázható. Másrészt az óceánok hatalmas

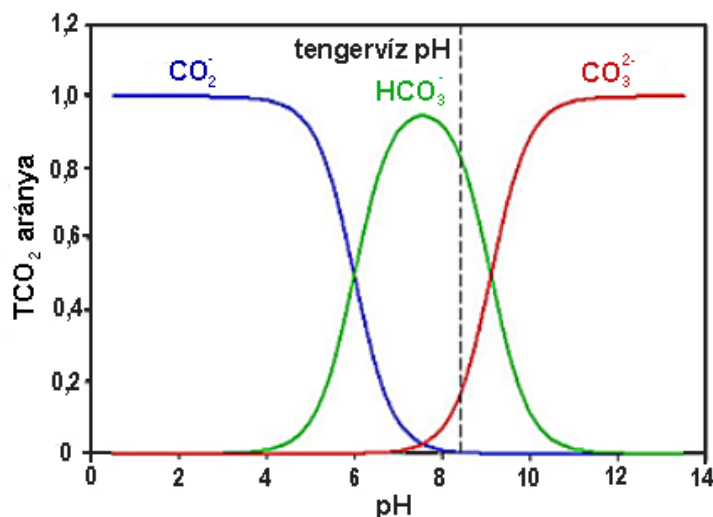
pufferkapacitása az oka a csekély pH változásnak. Ugyanis egy oldat megtartja pH értékét, ha egy gyenge sav (pl. szén-sav) és egy erős sav (sósav) sója van oldva benne akkor is, ha nagy mennyiségű gyenge savat adunk az oldathoz. Az óceánok klorid koncentrációja több nagyságrenddel nagyobb, mint a karbonaté, tehát a gyenge sav hozzáadott (CO_2) savasító hatását nagyban tompítja a tengervíz klorid tartalma (Seabold, 2017). Azt is figyelembe kell venni, hogy a mélységi vizekben a változások sokkal lassúbbak, mint a felszín közelében. A sűrűbb mélységi rétegek keveredése ugyanis általában lassúbb a kisebb fajsúlyú felszíni rétegekkel (kivéve a lebu-
kó zónákban).

A jelenség mutatja, hogy az óceánok pufferkapacitása nagyobb, mint a néhány évtizeddel korábban mért változás a felszíni vizekben, de az egyensúly beállta több évtizedes folyamat. Az óceánok savasodását mérsékli a melegebb klíma, mert a hőmérséklet emelkedésével csökken a szén-dioxid oldékonysága a vízben. Ráadásul a szilárd kalcium-karbonát oldékonysága csökken a hőmérséklet emelkedésével (White, 2013). A mészváz építő növényi szervezetek (algák) több tápanyag (ebben az esetben főleg szén-dioxid) miatti felfokozott biológiai aktivitása is mérsékli a pH változás nagyságát. Ezek a szervezetek ugyanis fotoszintézisük miatt szén-dioxid nyelőknek tekinthetők.

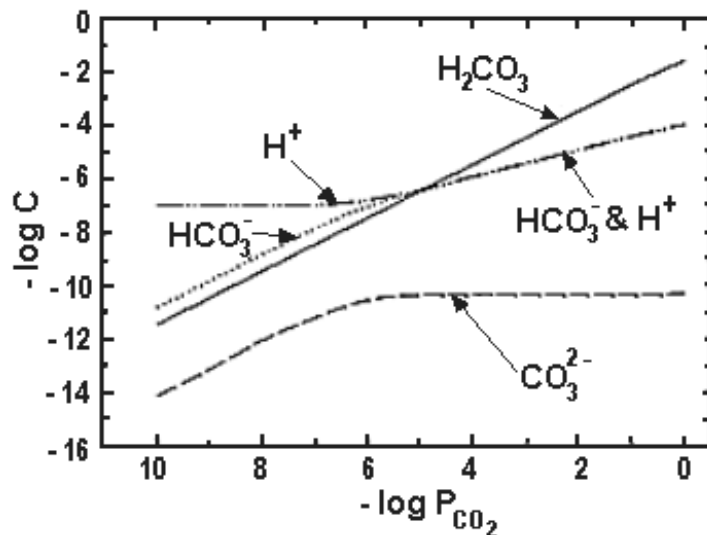
Az óceánok felszíni rétegei mindenhol túltelítettek a CaCO_3 szempontjából legalább 1000 m mélysé-
gig. A tengervízből való kiválást gyakran a kicsapódó anyagok kis koncentrációja limitálja (Seabold, 2017). Ezért ha valamilyen anyag bőven

van (pl. karbonát), nincs akadálya a kicsapódásának.

A mélység növekedésével a szén-dioxid parciális nyomása növekszik, ezért több oldódik be, mint a felszínen, azaz megnő az oldékonysága. Ez a változás csökkenti a karbonát ion koncentrációt (balra tolódik az egyensúly), ami telítetlenséget eredményez a szilárd CaCO_3 szempontjából (Seabold, 2017). A karbonát ion koncentrációja egyharmadára csökken a felszínhez képest abban a zónában, ahol a szén-dioxid koncentrációja maximumot mu-



1. ábra: A karbonát ionformák relatív koncentrációja és a pH közötti kapcsolat zárt rendszerben.



2. ábra: A szén-dioxid nyomás és a karbonát ion csökkenés kapcsolata

tat. A nyomással a CaCO_3 oldékonysága növekszik. 5000 m mélységben a CaCO_3 oldékonysága duplája a felszíni- nek. Az óceánban a karbonát kompenzációs mélység (*carbonate compensation depth CCD*) alatt a mészvázak feloldódnak a fent ismertetett okok miatt. Ennek a réteg- nek a neve *lysocline*. A fentiek miatt a talált tengeri mészkőlerakódások mind sekély tengeri képződmények (*White, 2013*). Azonban ezekbe a mélységekbe nagyobb- részt csak az elhalt állatok mészvázai jutnak le, tehát életfunkciójukat nem befolyásolja a váz beoldódása.

Eddig pusztán csak a fizikai-kémiai háttérrel foglalkoz- tunk, azonban a biológiai háttér sokkal meghatározóbb a mészvázképződésben. Még azok a tanulmányok jó része is, amelyek csak kémiai alapon számolnak (pH, kémiai potenciál) és nem veszik figyelembe a szerves védőréte- get, úgy vélik, hogy a várható pH változás (0,3) nem okoz szignifikáns változást a tenger biológiájában (*Hennige, 2014; O'Dea 2014*).

A karbonátos kőzetek kiválása elsősorban biológiai hatá- soknak köszönhető a tengerekben (*White, 2013; Misra, 2012*). CaCO_3 nagy mennyiségben termelődik főleg azon a területen, ahol még érvényesül a napfény hatása, azaz a mészvázak jelentős részben a fotoszintetizáló élőlények termékei. A kokkolit fitoplankton kalcitépítő intenzitása nőtt is az utóbbi 200 évben, mivel a megnövekedett CO_2 koncentráció elősegítette a fotoszintézisüket (*Wittmann, 2013*).

A növényi és állati mészvázak szervezetei (csigák, kagy- lók, foraminiferák, algák) haláluk után egyaránt lesüly- lyednek a fenékre (*White, 2013*). Mivel a CaCO_3 oldé- konysága növekszik a mélységgel, egy bizonyos mély- ségben az óceán telítetlenné válik a CaCO_3 szempontjá- ból és a mészváz feloldódik, ahogy ezt már bemutattuk. A koralloknál megállapították, hogy vázépítő sejteik nincsenek direkt érintkezésben a tengervízzel, ezért en- nek a pH-ja csak kis mértékben befolyásolja a mészváz kiépülését (*Wittmann, 2013*). Egyes szerzők szerint az óceánok jelenlegi savasodása nincs hatással a zátonyépí- tő korallokra, mivel ezek vázépítése biokontrollált (*Ri- ding, 2014*).

A tengerfenék pH-ját nagyban befolyásolja a tengerfenék összetétele (alapkőzet, üledék típusa), és kevésbé a fölöt- te lévő víz pH-ja. Tehát a korallok, és a fenéklakó szer- vezetek képződésénél sem meghatározó a tenger jelenle- gi savasodása (*Wittmann, 2013*). A pH napi ingadozása a korallzátonyoknál pH 7,8–8,3 is lehet (*Hennige, 2014*). *Ez pedig szélső értékben mintegy ötszöröse az elmúlt 200 év 0,1 egységnyi változásának, így ezért sem tűnik drasz- tikusnak a tengervíz savasodását okozó antropogén hatás.*

Számos foraminifera különböző kitin és/vagy más jellegű szerves védőrétege megvédi az élőlényeket a kalcitra telítetlen víz váz-oldó hatásától. A kalcittermelő sejtek izo- láltága a külső környezettől azt is lehetővé teszi, hogy a mészváz még CaCO_3 -ra telítetlen vízben is keletkezzen. Azonban az elhalt szervezetek oldódását már sokkal ke- vésebb gátolja a szerves védőrétegek. A savasodás miatt, a

kalcit kiváláshoz szükséges kis kémiai potenciál-többség nem meghatározó a biológiai folyamatok energia pro- dukciója mellett (*Wittmann, 2013*).

A kémiai és biológiai háttér áttekintése után meg kell vizsgálni azt is, hogy a szakirodalom milyen jóslásokat tesz az eljövendő folyamatokról. A szakirodalom nagy része a tenger savasodásából eredendő problémákat nem tartja tragikusnak a jelenlegi állapotban.

A múltbéli geológiai adatok önmagukban nem elege- ndők, hogy a várható klímaváltozásra adott biológiai vála- szok egyértelműen meghatározhatók legyenek (*Ernst, 2017*). A Perm időszak végén (P-Tr), 250 millió évvel ezelőtt, tömeges fajkihalás történt (*Benton, 2005*). Ugyanis ekkor a rendkívül megemelkedett vulkáni tevé- kenység nagy mennyiségű kénsavszennyezést okozott. A nagy mennyiségű kénsav okozhat akár több egységnyi pH változást, de magában is meglehetősen mérgező (*Ernst, 2017*). A Kréta időszak végén (K-T) 65,5 millió évvel ezelőtt egy meteorit valószínűleg a tengerbe csa- pódott, ami hatalmas cunamit okozott, ami felhozta a mélységi vizeket, ezért a tenger felszínének oxigén tart- alma drasztikusan lecsökkent, ami a tömeges kipusztulást okozott a tenger állatvilágában is. Ez a katasztrófa nem csak a dinoszauruszok eltűnését okozta (*Montanari, 2012*). A paleocén-eocén hőmérsékleti maximum idején is a légkör CO_2 tartalma egy nagyságrenddel magasabb volt a mainál, ami egyes mészvázú fajták eltűnését okoz- ta, de mások életfeltételeinek kedvezett (*Wittmann, 2013*). Kétségtelen, a több egységnyi pH változás már komoly problémákat okozhat a tenger élővilágában, de ilyen nagy változásra nincs reális előjelzés.

Azok a tanulmányok, amelyek a CO_2 -ben gazdag vizek- ben végeztek, csak korlátozottan általánosíthatók a jövő- beli jóslásokra. A felszálló hideg vizes áramlások CO_2 - ben gazdagok, tehát nem egyértelműen hozhatók össze- függésbe a globális felmelegedéssel (*Bednaršek, 2014; Milner, 2016*). Kétségtelen, hogy tapasztaltak korróziót egyes *Limacina helicina helicina f. pacifica* példányokon, de ezek nem sugallták a faj kipusztulását. A szerzők nem találtak direkt kapcsolatot a megnövekedett halandóság és a savasodás közt. A labor és a kagylótenyésztési eredmények csak korlátozottan érvényesek (*Wittmann, 2013*), mivel ezek nem természetes körülmények között történtek, gyakran extrém paraméterek között folytatták le. A tengervíz pH értékének kismértékű csökkenése nem biztos, hogy károsodást okoz, mivel egyes korallvidéke- ken a napi pH változás pH 7,8–8,3 tartományban van (*Hennige, 2014*). A korallok kifehéredését (*bleaching*) elsősorban a tengervíz hőmérséklet-emelkedésével és fertőzésekkel magyarázzák és nem a pH változásnak tu- lajdonítják.

Több tanulmány sokkal nagyobb CO_2 koncentrációval (>1000 ppm) számol, mint ami reálisan várható (*Witt- mann, 2013; Exploring Ocean Change, BIOACID, 2017*), ezért eredményeik csak korlátozottan használhatóak. Nem tűnik nagy valószínűséggel bekövetkező állapotnak,

hogy a tengerek átlag pH-ja elérje a 7,8 értéket, vagy a 3,7 °C hőmérsékletemelkedést.

A tengeri élőlények jó része ki tudja védeni a változásokat vagy alkalmazkodással, vagy genetikai változásokkal (*Exploring Ocean Change, BIOACID, 2017; Sunday, 2014*). A populáció méretű károsodás elkerülésére a rövidéletű mészvázúaknak van a legjobb esélye (pl. foraminiferák). Ha a mainál sokkal savasabb oldatba tesszük (750 ppm CO₂) akkor a mészvázak feloldódhatnak. Azonban a változás nem ilyen hirtelen és valószínűleg kisebb léptékű, ezért a kísérlet nem vihető át valós veszélyként (Kolbert, 2011).

A jelenlegi felmérések kimutatnak káros tendenciákat a mészvázúakra, de ezek nem tragikusak, és a jövőre adott jóslásaik nem határozott kijelentések, hanem esetleges több-kevesebb valószínűséggel bekövetkező események. Kalkulációikban ezek is gyakran nem a várható változások paramétereivel számolnak, hanem a várhatónál sokkal nagyobb változásokkal. Más szerzők szerint a reálisan várható CO₂ emelkedés nem okoz szignifikáns változást a mikroorganizmusok életében (*Exploring Ocean Change BIOACID, 2017*). A kézirat megszerkesztése után publikálták az IPCC 1.5 jelentést, de ez nem foglalkozik érdemlegesen a tengeri mészvázúakkal (IPCC, 2018).

Az irodalom alaposabb átvizsgálása után megerősödött meggyőződésünk, hogy nincs reális esélye az élő tengeri mészvázások házának jelentős feloldódására a jelenlegi tendenciák között. Természetesen a mészvázúak jövőbeli károsodását sem lehet teljesen kizárni. A klímaváltozás veszélyeinek hangsúlyozása, tudományos alapon nyugvó értékelése napjaink egyik legfontosabb feladata. Azonban törekedni kell a tendenciák és az ebből levont következtetések kétséget kizáró megalapozottságára. Óvakodni kell az olyan megállapításoktól, amelyek nem kellően alátámasztottak, vagy kis valószínűséggel következnek be. Ugyanis ezen túlzó és riasztó vélemények biztos jövőképként való bemutatása aláássa a hiteles klímakutatói véleményeket. Vigyázni kell arra, hogy e tudományterület ne jusson a hazug pásztorfiú sorsára.

Irodalom

Bednaršek, N., et al., 2014: *Limacina helicina* shell dissolution as an indicator of declining habitat suitability due to ocean acidification in the California Current, *Ecosystem. Proc. R. Soc. B* 30, 281(1785):20140123.

Benton, M. J., 2005: *When Life Nearly Died: The Greatest Mass Extinction of All Time*. Thames & Hudson. ISBN 978-0-500-28573-2.

- Ernst, R. E. and Youbi, N., 2017: How Large Igneous Provinces affect global climate, sometimes cause mass extinctions, and represent natural markers in the geological record *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 478, 30–52.
- Exploring Ocean Change, 2017: BIOACID – Biological Impacts of Ocean Acidification.*
https://www.oceanacidification.de/wp-content/uploads/2017/10/BIOACID_brochure_e_web.pdf
- Hennige, S., ed, 2014: An Updated Synthesis of the Impact of Ocean Acidification on Marine Biodiversity Technical Series No. 75, <https://www.cbd.int/doc/publications/cbd-ts-75-en.pdf>.
- IPCC_WG3_AR5 Summary-for-Policymakers, 2013:
https://www.google.com/search?q=WGIAR5-SPM_Approved27Sep2013.pdf+Twelfth+Session+of+Working+Group+I+Approved+Summary+for+Policymakers+Summary+for+Policymakers%2C+Working+Group+I+Contribution+to+the+IPCC&oq=WGIAR5-SPM_Approved27Sep2013.pdf+Twelfth+Session+of+Working+Group+I+Approved+Summary+for+Policymakers+Summary+for+Policymakers%2C+Working+Group+I+Contribution+to+the+IPCC&aqs=chrome..69i57.4091j0j8&sourceid=chrome&ie=UTF-8.
- IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C, 2018:
<https://www.ipcc.ch/sr15/lawr.ucdavis.edu/classes/ssc102/section5.pdf>.
- Milner, S., et al., 2016: Ocean warming modulates the effects of acidification on *Emiliania huxleyi* calcification and sinking *Limnol. Oceanogr.*, 61, 1322–1336, doi:10.1002/lno.
- Misra, K. C., 2016: *Introduction to Geochemistry: Principles and Applications*, Wiley.
- Montanari, A., 2012: szóbeli közlés.
- O’Dea, S. A., et al., 2014: Coccolithophore calcification response to past ocean acidification and climate change, *Nature Communications* 5: 5363, DOI: 10.1038/ncomms6363; www.nature.com/naturecommunications
- Riding, R., Liang, L. and Braga, J. C., 2014, Millennial-scale ocean acidification and late Quaternary decline of cryptic bacterial crusts in tropical reefs. *Geobiology* 12(5):387–405 DOI: 10.1111/gbi.1209.
- Seibold, E. and Berger, W. H., 2017: *The Seafloor an Introduction to Marine Geology*, Springer.
- Sunday, J. M. et al., 2014: Evolution in an acidifying ocean. *Trends in Ecology and Evolution* 29, 117–125.
- White, W. M., 1989: *Geochemistry, Chapter 15: The Oceans as a Chemical System*, 2013, Wiley.
- Wittmann, A. C. and Pörtner, H. O., 2013: Sensitivities of extant animal taxa to ocean acidification. *Nat. Clim. Change* 3, 995–1001.