

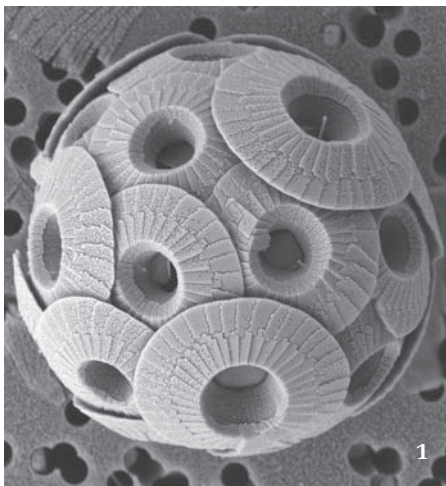
Mořský plankton v globálním koloběhu prvků

Globální koloběh prvků v přírodě je projevem i motorem života na Zemi. Látková přeměna v metabolismu organismů se projevuje i na nejvyšší úrovni v rámci celých ekosystémů, v nichž se živiny postupně transformují z jedné formy na další v potravních řetězcích, ale nejen to. Mikroorganismy mohou svou činností ovlivňovat okolí natolik, že zásadně mění dokonce i chemické a fyzikální faktory prostředí. Globální cykly prvků jsou vzájemně propojeny do komplexních systémů, jejichž pochopení nám zatím uniká. I proto James Lovelock shrnul samoregulační potenciál globálních ekosystémů ve své známé hypotéze Gaia. V článku si představíme některé z nejzajímavějších příkladů a protagonistů biogeochemických cyklů.

Kokolity a koloběh uhlíku, síry a vody
Nejskloňovanějším je cyklus uhlíku, na němž se podílejí fotosyntetické organismy odběrem oxidu uhličitého z atmosféry, který přeměňují ve fotosyntéze. Z fixovaného uhlíku produkují svou biomasu a zároveň se jako vedlejší produkt uvolňuje kyslík, který dýcháme společně s nimi. Uvádí se, že přibližně polovina tohoto koloběhu se odehrává v terestrických lesích (zejména tropických deštných lesích a tajze) a druhá ve světových oceánech mimo jiné díky fytoplanktonu – mikroskopickým sinicím a řasám (obr. 2).

Některé mikroskopické řasy kromě fotosyntetické fixace uhlíku do organických látek vytvářejí drobné destičky z uhličitanu vápenatého (většinou v podobě kalcitu, krystalizujícího v šesterečné soustavě, méně pak aragonitu v soustavě kosočtverečné). Oxid uhličitý se rozpouští v mořské vodě za tvorby kyseliny uhličitě, ta disociuje jako hydrogenuhličitán, který se dál přeměňuje v buňkách řas a krystalizuje spolu s vápenatými ionty jako nerozpustný uhličitán vápenatý.

Mezi takové řasy patří např. kokolity (Coccolithophorida, Haptophyta, obr. 1). Žijí především v chladnějších vodách temperátních a subarktických oblastí, kde mohou za příznivých podmínek tvořit dokonce vodní květy bílého zbarvení (anglicky white tides nebo white water), daného rozptylem světla na jejich kalcitových destičkách. Vodní květy mají až tak obrovské rozměry, že je vidíme na snímcích ze satelitů (obr. 3). Po masivním nárůstu vzápětí následuje hromadný úhyn – v důsledku úbytku živin, bakteriální či virové nákazy nebo toho, že se řasy stanou potravou zooplanktonu. Schránky mrtvých buněk klesají na dno a z kalcitových destiček zde vznikají v geologickém čase vrstvy vápence mocné i stovky metrů, které známe např. z křídových útesů v Doveru. Ve vápencových sedimentech se atmosférický uhlík (resp. CO₂ rozpouštěný v moři)



1 Schránka mořské řasy kokolity (Coccolithophorida, Haptophyta). Povrch buňky je pokryt drobnými destičkami z uhličitanu vápenatého, který tvoří sedimenty na mořském dně ve velkých mocnostech. Foto J. Nebesářová, Laboratoř elektronové mikroskopie Biologického centra AV ČR v Českých Budějovicích

efektivně vyřazuje z globálního cyklu. Účel tvorby kalcitových destiček těmito řasami stále přesně neznáme, různé hypotézy hovoří mimo jiné o potenciální anti-predační funkci, mechanické bariéře před vstupem bakterií a virů do buňky či metabolických výhodách souvisejících s kalcifikací (např. Tyrrell a Young 2009 nebo Müller 2019).

Kokolity zároveň produkují plynné organické sloučeniny síry (dimetylsulfonio-propionát), jejichž pach je pachem moře a ryb. Ve velkém množství mořských organismů (makroskopických řas i živočichů) slouží jako osmoregulační prostředek pro udržování vnitřního prostředí buněk vůči osmoticky aktivní mořské vodě. Ve vodě a v atmosféře je oxidován na dimetylsulfid a dimetylsulfoxid, které jsou kondenzačními jádry

pro vodu a proměňují ji v mraky. Zde do hry vstupuje CLAW hypotéza pojmenovaná podle svých autorů – britských a amerických vědců Roberta J. Charlsona, Jamese Lovelocka, Meinrata Andreaea a Stephena G. Warrena (1987), z nichž je nejznámější již v úvodu zmíněný J. Lovelock. CLAW hypotéza ukazuje na globální regulační proces negativní zpětné vazby ve velmi zjednodušené formě. Sluneční záření otepluje vodu oceánů a mikroskopickým řasám umožňuje efektivní fotosyntézu a růst, čímž se zároveň zvyšuje jejich produkce organických sloučenin síry, dostávajících se do ovzduší, kde způsobují kondenzaci vodní páry a tvorbu mraků. Mraky mají vysokou odrazivost pro sluneční záření (albedo) a tady dochází k negativní zpětné vazbě (obr. 5). Odražené záření již není využito řasami k růstu, klesne jejich počet, a tedy i produkce organických sloučenin síry, pára nebude kondenzovat do mraků a slunce opět zaplaví s větší intenzitou mořskou hladinu.

Anti-CLAW hypotéza v globální regulaci klimatu

V ekosystémech však může dojít k určitému ději – hysterezi – směrem, který neumíme předjímat. Hystereze je chování dynamického komplexního systému, které v sobě obsahuje paměťový efekt – zjednodušeně, pokud se přesáhne „pufrační“ kapacita, kdy je systém v jednom stavu, může se skokově dostat přes bod zvratu do zcela jiného stavu, a tak i do pozitivní zpětné vazby. Tuto situaci pak J. Lovelock rozvádí jako anti-CLAW hypotézu (obr. 6).

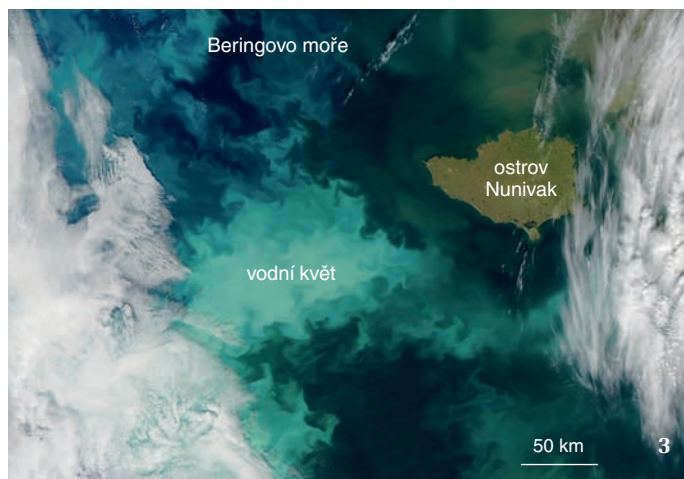
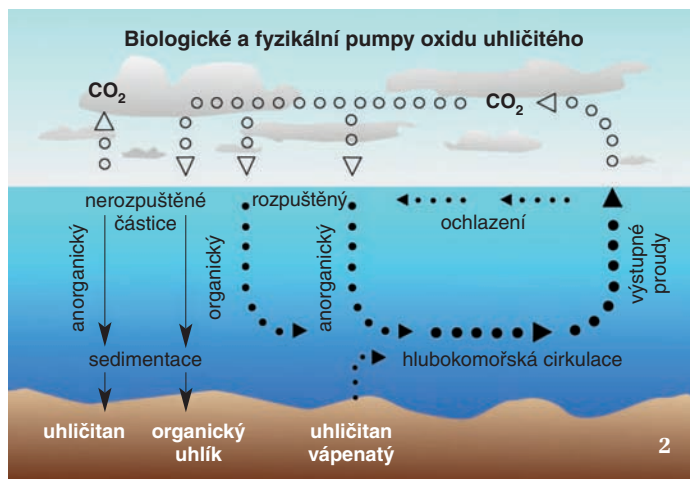
Jak jsem již naznačila výše, haptofytiní řasy, kam spadají kokolity, dávají přednost spíše chladnější či mírně teplé vodě. Proto pokud do tohoto cyklu zasáhne globální oteplení způsobem, že již nebudou tak dobře růst, nebudou produkovat své těžké sloučeniny síry, voda nebude efektivně kondenzovat v mracích a chladivá moc albeda poklesne. Voda v oceánu se začne ještě více oteplovat zářením, které nebude odraženo, a řasy budou o to více strádat.

Dále mohou změny klimatu s nárůstem teplot a změnami proudění vzduchu i mořských proudů vést k intenzivnější stratifikaci (rozvrstvení) vod, což znesnadní transport živin z hlubších vrstev, kam sedimentují. Tím se sníží úživnost u hladiny a omezuje produktivita jak primárních producentů (sinic a řas), tak jejich konzumentů v celém potravním řetězci.

Koloběh dusíku – doména sinic a dalších bakterií

Na rozdíl od ostatních makrobiogenních prvků jsou hlavními motory koloběhu dusíku prokaryota, protože mají k dispozici enzymatický aparát, který eukaryotům chybí. Dusík je zásadním prvkem v proteinech a nukleových kyselinách (DNA a RNA). Tvoří 78 % atmosféry, ale pro většinu organismů je v této formě nedostupný. Fixace vzdušného dusíku probíhá díky enzymu nitrogenáze v přísně bezkyslíkatém prostředí, a jde o vysoce energeticky náročný proces.

Existuje mnoho volně žijících organismů schopných fixovat dusík v různých prostředích včetně oceánů. Mořské sinice (např. zástupci rodů *Anabaena* a *Oscillatoria*)

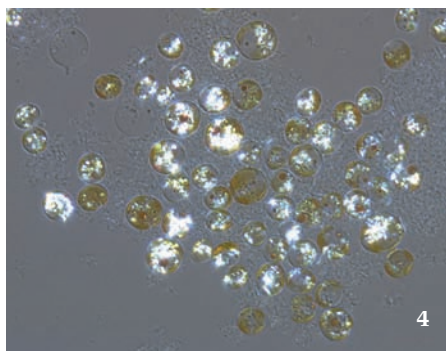


fixující dusík byly také „uchočeny“ jinými organismy, kterým přináší jako velkou výhodu přídatný zdroj dusíku. Sinice tak využívají např. jednobuněčné řasy (rozsvivku *Rhopalodia gibba*, obrněnku rodu *Ornithocercus*). V jiných než mořských prostředích to jsou i lišejníky – hávnatka psí (*Peltigera canina*), kapradiny (rod *Azolla*) a rostliny (cykasy, rod *Gunnera*). Další bakterie fixující dusík (rhizobakterie) jsou symbionty bobovitých rostlin (*Fabaceae*). Biologická fixace dusíku je s výhodou využívána např. na rýžových polích, kde se spolu s rýží pěstuje vodní kapradina azola s její symbiotickou sinicí fixující dusík a obohacující tak prostředí o důležitou živinu. Využívá se také při střídání plodin na polích, kam jsou zařazovány bobovité rostliny, aby půdu obohatily o dusík díky přítomnosti hlízových bakterií v kořenech (více na str. 125–131 a také Živa 2006, 1: 9–12; 2018, 1: XIX–XXIII).

Zemědělsky využívaným rostlinám se začalo v 19. století přilepšovat dusíkatými hnojivy, která se těžila v podobě guána a ledku, a to až do objevu Haberovy–Boschovy syntézy amoniaku. Tento objev vedl nejen k primárnímu účelu – produkci výbušnin německou stranou během první světové války, ale hlavně k následnému masivnímu používání průmyslových hnojiv v zemědělství a zvyšování eutrofizace prostředí. Statistiky hovoří o tom, že za posledních 100 let umožnila tato reakce čtyřnásobnou intenzifikaci zemědělské produkce a s tím spojený populační boom. Dokonce až 50 % dusíku v našich tělech pochází právě z průmyslových hnojiv, z umělé fixace dusíku podle receptu německých sousedů z minulého století (Smil 2003).

V cyklu dusíku dochází také k procesu nitrifikace – oxidace amonných iontů na dusitany a dusičnany u kosmopolitně rozšířených bakterií (např. díky rodům *Nitrosomonas* a *Nitrobacter*) – a opačnému procesu denitrifikace – redukce dusičnanů na plynný dusík a oxid dusný (např. bakterie *Pseudomonas denitrificans*).

Pro zajímavost uvedme, že jsme s kolegy právě objevili velmi překvapivou, dosud opomíjenou zásobárnu dusíku v podobě krystalů purinů, které jinak tvoří nukleové kyseliny, a to napříč nejrůznějšími druhy mořských a sladkovodních řas (Mojžeš a kol. 2020). Tyto krystaly krásně polarizují světlo (obr. 4), proto se dá spekulovat o jejich dalších rolích, např. v zefektivnění fotosyntézy nebo v ochraně před dopadající-



cím ultrafialovým zářením, v kombinaci se světločivnými skvrnami (stigmaty) dokonce k fotorepci (vnímání světla). Krystaly purinů jsou totiž také přítomné ve světločivných skvrnách některých obrněnek a u živočichů tvoří reflexní vrstvu na pozadí očí hlubokomořských ryb a nočních bezobratlých.

Oceánské pouště a železná hypotéza

Oproti terestrickým ekosystémům, které mají těžší biodiverzitu i celkové produkce biomasy v tropech a subtropích, jsou tyto oblasti oceánů často pusté, a proto se označují oceánské pouště. To ilustrují satelitní snímky zobrazující rozložení chlorofylu v oceánech (obr. 7). Pokud jsou oceánské pouště analogií těm terestrickým, pak bohaté tropické lesy mají protějšek v korálových útesech. Živin je ve všech jmenovaných prostředích pomálu. Tropické lesy a korálové útesy jsou oligotrofními prostředími, kde jsou veškeré živiny přítomné v biomase organismů. Tento jev pozoroval už Charles Darwin během plavby na lodi Beagle, a proto se mu říká Darwinův paradox. Mořské vody jsou nejbohatší na živé organismy převážně v šelfových oblastech blízko pevninského pobřeží, kam živiny přináší řeky a splach z pevniny. „Oceánské pouště“ dlouho vzbuzovaly rozruch a vědci se pídili po příčině tohoto jevu.

Limitujícím prvkem pro růst řas ve sladkovodním prostředí bývá často dusík a fosfor, tedy makrobiogenní prvky. Až v 80. a 90. letech 20. století jednoduché pokusy amerického oceánografa prof. Johna Martina přinesly převrat a nastolily období překotného výzkumu, kterému on sám začal přezdívat doba železná. Dlouho hledaným prvkem, který je limitující pro primární produkci moří a oceánů, je kromě dusíku právě železo. J. Martin po přidání zdroje železa do vzorku mořské vody

2 a 3 Koloběh uhlíku v oceánech zahrnuje rozpouštění plynného oxidu uhličitého, který se následně transformuje a v různých anorganických a organických formách se může ukládat i na dně, odkud je zase mobilizován (obr. 2). Zastavit se může v podobě uhlícitánu vápenatého v kalcitových destičkách kokolitek, jejichž obrovské, bílé zbarvené vodní květy lze pozorovat ze satelitu (3). Po odumření řasy schránky sedimentují na dno oceánu. Převzato z Wikimedia Commons (2) a NASA, Earth Observatory (3)

4 Fotografie mikroskopických řas (ca 10 μm v průměru) s obsahem guaninových krystalů, které září v polarizovaném světle. Foto J. Pilátová

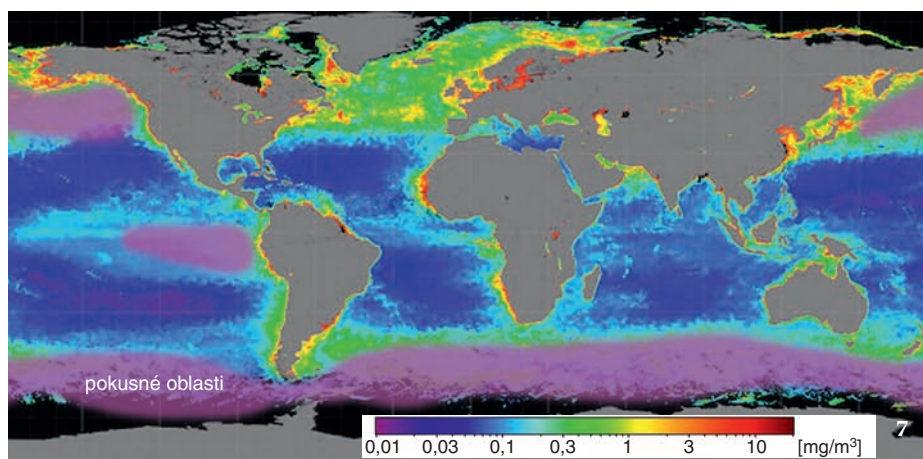
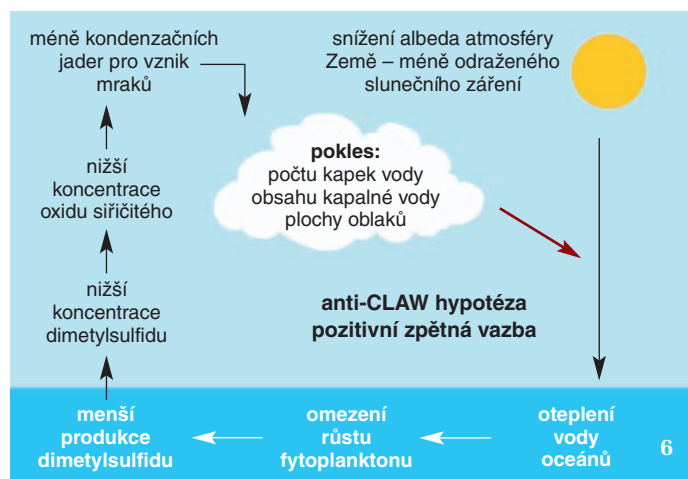
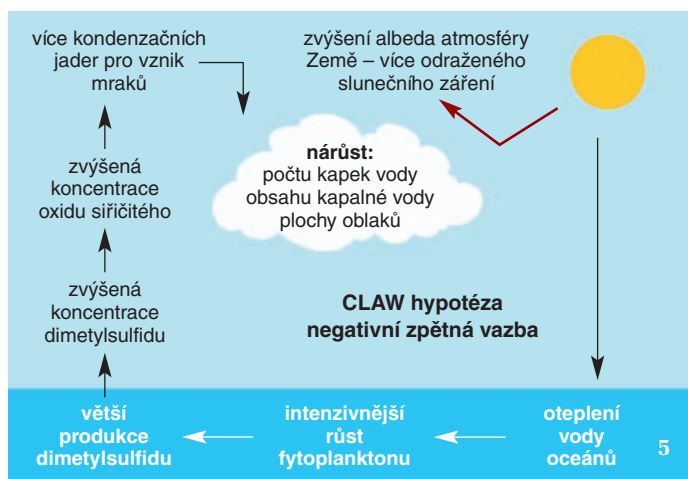
5 Schéma CLAW hypotézy – negativně zpětnovazební regulace komplexního mořského systému řas, cyklu síry, vody a řízení globálního klimatu. Blíže v textu. Podle: R. J. Charlson a kol. (1986)

6 Anti-CLAW hypotéza v globální regulaci klimatu – scénář příkladu dynamického chování, které převede negativně zpětnovazební systém do pozitivní zpětné vazby, jež vede k jeho devastaci. Blíže v textu. Podle: J. Lovelock (2006)

7 Oceánské pouště viditelné na satelitních snímcích jako oblasti s nízkou koncentrací chlorofylu ukazující na minimální množství fytoplanktonu. Ve fialové označených oblastech proběhly úspěšné pokusy se zvýšením produktivity oceánů přidáním železa (blíže v textu). Převzato z NASA, Earth Observing System Data and Information System, upraveno. Všechny snímky v souladu s podmínkami použití

z arktických oblastí pozoroval obrovský nárůst biomasy řas oproti kontrole (blíže obr. na webové stránce Živy). Jeho výzkum vzbudil obrovský ohlas. Proslulý je např. výrok: „Dejte mi půl tankeru železa a vytvořím novou dobu ledovou“. S nadsázkou tím v počátcích poukazyval, že může díky hnojení moří železem vyvolat efektivní nárůst biomasy řas, které zlikvidují tolik skleníkového plynu CO₂, že inženýrsky docílí ochlazení Země.

Na začátku zněla jeho úvaha velmi slibně. Pokud by šlo jednoduše „hnojit“ oceány železem, mohli bychom pěstovat mořské řasy ve velkém i tam, kde příliš nerostou. Jak jsme zmínili, řasy spotřebovávají CO₂ z atmosféry, fixují uhlík v buňkách, a když uhynou, usadí se na dně. Oceány jsou velmi hluboké – v průměru 3,7 km. Z takové



hloubky stratifikované vody se živiny uvolňují jen velmi pomalu. Podle zjednodušené představy by se tak uhlík ze vzduchu transformoval do biomasy, která po úhynu stáhne na dno i v sobě uložený uhlík.

Podobné jednoduché scénáře mají ale většinou mnoho háček i logických chyb. Kde bychom získali dostatek železa a dalších živin pro „krmení“ řas? Byla by bilance CO_2 vznikajícího v produkci „hnojiv“ a jejich distribuci v oceánu dostatečně nízká pro kýžený odběr z atmosféry v narostlé biomase? Výpočty se zjistilo, že i kdyby se používal nejdostupnější zdroj železnatých solí – síran železnatý vznikající jako vedlejší produkt během výroby titanu, ani celosvětová produkce by nestačila na dostatečné hnojení, jehož výsledkem by byl zřetelný pokles CO_2 v atmosféře. Nemluvě o environmentálním dopadu, který by tak velký zásah mohl přinést – v nejhrošším kolaps celého ekosystému.

Kromě sporů ohledně nedozrnlých následků pro oceánské ekosystémy po bezohledných velkoplošných zásazích, o nichž se nedalo dostatečně předvídat, co způsobí, pokračovaly pochyby i na politické úrovni. Panovaly obavy, že již docílené ekologicky zaměřené dohody budou staženy, pokud bude možné opravdu tak jednoduše zastavit globální oteplování. Souběžně se tedy začaly uskutečňovat rozsáhlé pokusy – do oceánů se sypaly z lodí nebo letadel tuny železnatých solí. Již do týdne od aplikace vždy následoval masivní nárůst řas. Ve většině z asi 14 takových pokusů (např. Morrissey a Rowler 2012; obr. 7), publikovaných v nejprestižnějších časopisech, ale došlo především k nárůstu biomasy toxických rozsivek.

Mořské rozsivky (Bacillariophyceae) jsou běžnou součástí fytoplanktonu a výrazně přispívají k primární produkci. Určité druhy, které tvoří neurotoxiny (např. rod *Pseudonitzschia* kyselinu domoovou), ale mohou představovat velký problém, pokud se masivně přemnoží a toxiny se nahromadí v potravním řetězci. Na dešifrování metabolické dráhy tvorby kyseliny domoové se podíleli také kolegové z Biologického centra AV ČR v Českých Budějovicích pod vedením prof. Miroslava Oborníka. I pro potenciální nebezpečnost rozsáhlých zásahů do mořských ekosystémů bylo od podobných záměrů upuštěno a vypouštění železa do oceánů je ilegální, jako veškeré znečišťování prostředí. Přírodním přísunem železa jsou nadále např. splachy z pevniny, výstupy hlubinných proudů k hladině, sopečné erupce, obrovské lesní požáry či písečné bouře, které mohou z železitých písků Sahary přenést tuny železa nad oceán.

I v oceánských pouštích, stejně jako na těch terestrických, však nějaký život najdeme. Obývají je pikoplanktonní sinice a řasy (blíže na str. XCII–XCIII kuléru). Zjistili jsme, jak se tyto řasy adaptovaly na to, že jsou vystaveny hladu po železe, které je ve vodě v tak malých koncentracích, že by ho neuměl vycítat žádný dosud známý přenašeč (Lelandais a kol. 2016). Řasy dokážou zkoncentrovat železo na povrchu buněk díky proteinu FEA1 (Fe assimilating protein 1), který se nám podařilo identifikovat, a následně může probíhat některá z již známých biochemických cest příjmu železa. O železo je velká kompetice, a tak ho např. sinice vycítávají siderofory, což jsou nízkomolekulární sloučeniny vypuštěné

sinicemi do vody, které tento prvek blokují před konzumací jinými organismy.

Opálové ozdoby rozsivek

Dalším spíše opomíjeným, ale velmi zajímavým tématem je koloběh křemíku díky řasám, které si z oxidu křemičitého tvoří schránky a šupiny. Nejznámějšími jsou rozsivky, jejichž pravidelné, až ornamentální struktury inspirovaly jak umělce, tak odborníky na moderní nanotechnologie, experimentující s rozsivkovými schránkami jako s miniaturními polovodičovými součástkami. Rozsivky však našly využití již dávno. Mocné sedimenty, které po nich zůstaly na dně vodních těles, se nacházejí i u nás, např. v Třeboňské pánvi. Rozsivková zemina, křemelina, tripel nebo diatomit je materiál používaný pro filtraci kvasinek z piva a vína apod., jako plnidlo zubních past a jiných přípravků, také jako jemné brusivo, žáruvzdorný, a navíc velmi lehký stavební materiál. Alfred Nobel diatomit použil ve slavném dynamitu, kde figuroval jako inertní složka stabilizující směs nitroglycerinu.

Bez kyseliny křemičité se buňky rozsivek nedělí, jsou na ní bezpodmínečně závislé (více v Živě 2018, 2: 63–65). Během buněčného dělení se obě poloviny schránky oddálí a každá z dceřiných buněk si vytvoří novou druhou polovinu jako přesnou, o něco menší kopii té původní; i když do ní výzkumníci udělali navíc vryp, všechny struktury se přepsaly podle své předlohy. Existují různé hypotézy, proč rozsivky tvoří křemičité schránky. Uvažují se opět anti-predační funkce či modifikace intenzity světla vzhledem k fotosyntetizujícím plastidům a bránění patogenům v průniku do buněk (např. Ellegaard a kol. 2016). Marginální hypotézou je spotřeba kyseliny křemičité v enzymech replikačního aparátu, odpad po jejím použití je vyloučen na povrch buňky. Zároveň je tvorba buněčné stěny z křemičitanů energeticky výhodnější než biosyntéza celulózy.

Mikrobiální mořská společenstva jsou hnací silou globálních biogeochemických cyklů. Mohou tvořit mocné vrstvy sedimentárních hornin, produkují kyslík, který dýcháme a živí vodní ekosystémy.

Doplňující materiály a odkaz na video k tématu najdete na webové stránce Živý.

Pozn. redakce: K tématu oceánských pouští se v budoucnu s upřesněním popisovaných jevů v Živě ještě vrátíme.