

Nový pohled na systém řas a jak ho učit?

V prvních českých učebnicích, která se věnuje sinicím a řasám (Vilhelm 1931 – Archaiophyta a Algophyta), je tehdejší pohled na systém těchto organismů komentován autorem následovně: „Fylogenetické bádání o bezcévných rostlinách dostoupilo v poslední době značné výše použitím různých nových metod a způsobilo časté převraty v nazírání na tuto část rostlinstva“ a současně dodává, že: „Mnoho však nerozřešených otázek se zde naskytuje pro badatele.“ Komentář prof. Jana Vilhelma je nadčasový, a přestože byl pronesen před více než 85 lety, zůstává dodnes platný a bude platit i v budoucnu. A to nejen pro sinice a řasy. Vědecký pokrok a poznání se nezastaví a nové sofistikované metody budou stále přinášet nové poznatky ze všech oblastí živého světa. Pro vědecký svět jsou to zásadní objevy, pro veřejnost však působí většinou jen jako jakési kuriozity a pro učitele jsou matoucí. Snad tento článek pomůže ujasnit si pohled na sinice a řasy a především zdůrazní jejich význam pro člověka i život na Zemi.

Hezky od začátku, tedy od Linného

Jak se vyvíjel názor na utřídění živého světa, již bylo v letošním ročníku Živy řešeno (2016, 1: 27–30), my se zde budeme detailně věnovat právě postavení sinic a řas v systému. Bavíme-li se o systematické, musíme začít od švédského přírodovědce a lékaře Carla Linného (1707–78), jenž byl zakladatelem nomenklatury, a současně ve svém díle *Systema naturae* (Soustava přírody, vydaném r. 1735) navrhl členění celého světa na neživou přírodu (minerály, horniny, zkameněliny) a rostlinnou říši spolu s říší živočišnou. V Linného době byla pozice řas zcela jasná. Stejně jako většina výtrusných rostlin spadaly např. společně s houbami do jedné z rostlinných tříd – Cryptogamia. Pro tuto skupinu existuje poetický český název tajnosnubné, vycházející z nepřítomnosti viditelných rozmnožovacích orgánů, ve srovnání se semennými rostlinami. Studium těchto rostlin se soustřeďovalo v kryptogamologických odděleních rozličných vědeckých botanicky orientovaných institucí a i dnes jsou řasy spolu s houbami předmětem studia botaniky, přestože víme, že s rostlinami tak moc společného nemají. Sám Linné popsal kolem 400 mikroskopických i makroskopických druhů řas, včetně vlajkového druhu středoškolských učebnic válečné koulivého (*Volvox globator*).

Zdokonalení mikroskopu – objevení problémů

Po sestrojení jednoduchého mikroskopu holandským přírodovědcem Antoni van Leeuwenhoekem (1632–1723) a jeho pozdějším zdokonalením anglickým vědcem Robertem Hookem (1635–1703) se před tehdejšími badateli otevřel zcela neznámý svět – mikrosvět. Náhle byly objevovány a vědecky popisovány nové mikroskopické organismy, včetně sinic a řas. Čím víc jich

bylo, tím větší vznikl problém s jejich zařazením do systému, Linného prosté dělení na rostliny a živočichy přestávalo stačit. Situaci se pokoušelo řešit několik vědců tím, že pro „problematické“ organismy vytvořili vlastní skupinu označovanou Protozoa, Protocista, Protista... zkrátka prvoci. Nejvíce se v tomto ohledu ujal koncept protistních organismů německého evolučního biologa Ernsta Haeckela (1834–1919), který mezi Protista zahrnul organismy, jejichž organizace zůstává na úrovni buňky, ať už ve formě jednotlivých buněk, nebo jejich kolonií. Protista v Haeckelově pojetí však neobsahovala pouze eukaryotní organismy, nýbrž také bakterie. Ale pro nás je hlavní, že se díky Haeckelovým fylogenetickým stromům ukázala nejednotnost řas – makroskopické řasy (např. parožnatky, mořské chaluhy, zelené řasy a ruduchy) byly roztroušeny po rostlinné části stromu, zatímco většina mikroskopických řas byla zařazena do protist (viz také obr. 3 na str. CXXXVI kulůru této Živy).

Postavení řasových organismů mezi rostlinami a protisty se nezměnilo ani v průběhu 20. stol., kdy americký ekolog Robert Whittaker (1920–80) navrhl klasifikaci živých organismů na základě jejich potravních preferencí. I v jeho systému nacházíme některé řasy jako součást prvoků a některé mezi rostlinami.

Nový molekulární pohled

První velké změny v chápání taxonomie a fylogeneze eukaryotních organismů, která byla do té doby postavena především na morfologických znacích anebo na ekologii, přinesl nástup metod molekulární biologie a fylogenetiky. První zásadní počin v této éře biologie učinil Thomas Cavalier-Smith (*1942) zavedením skupiny Chromista v r. 1981. Do nově ustanovené eukaryotické říše spadaly některé řasy – především

hnědé řasy (rozsivky, zlativky, chaluhy atd.), skrytěnky nebo obrněnky. Hlavním sjednocovacím znakem chromistních organismů jsou dva bičíky, z nichž jeden pokrývá řady vlásků – mastigonemat. Vývoj poznání příbuzenských vztahů mezi eukaryotními organismy postupně ukazoval nejednotnost tradičních, avšak ryze umělých skupin, jakými byli prvoci, houby a samozřejmě také řasy. Většina těchto organismů se ocitla rozmístěná napříč fylogenetickými stromy. Ani poslední dekáda moderních molekulárních metod nepřinesla na mnohé otázky jasné odpovědi. Jeden z nejčastěji uváděných moderních pohledů na organizaci živého světa publikovaný kanadským biologem Sinou Adlem a spoluautory v r. 2012 jasně definuje několik velkých eukaryotních skupin – Opisthokonta, Amoebozoa, Excavata, Archaeplastida a SAR (kam náležejí skupiny Stramenopila, Alveolata a Rhizaria). Řasy tvoří v tomto novém systému součást tří skupin – zelené řasy, ruduchy a Glaucophyta řazené mezi rostlinné organismy ve skupině Archaeplastida, hnědé řasy společně s obrněnkami náležejí ke skupině SAR a krásnoočka jsou nejpříbuznější jiným prvokům ve skupině Excavata. Přestože může práce S. Adla a kolektivu působit jako konečné vyřešení otázky příbuzenských vztahů mezi eukaryotními organismy, ve skutečnosti to tak úplně není. U některých skupin ani moderní přístupy a analýzy, dostupnost velkého množství sekvencí DNA apod. nedokázaly dát uspokojivou jasnou odpověď na příbuznost těchto taxonů s ostatními eukaryotními organismy. Z řasových skupin není dnes zcela objasněna fylogenetická pozice Haptophyta a skrytének. Posunutí našich znalostí o těchto a dalších skupinách nejistého postavení je pravděpodobně práce pro další vědecké týmy.

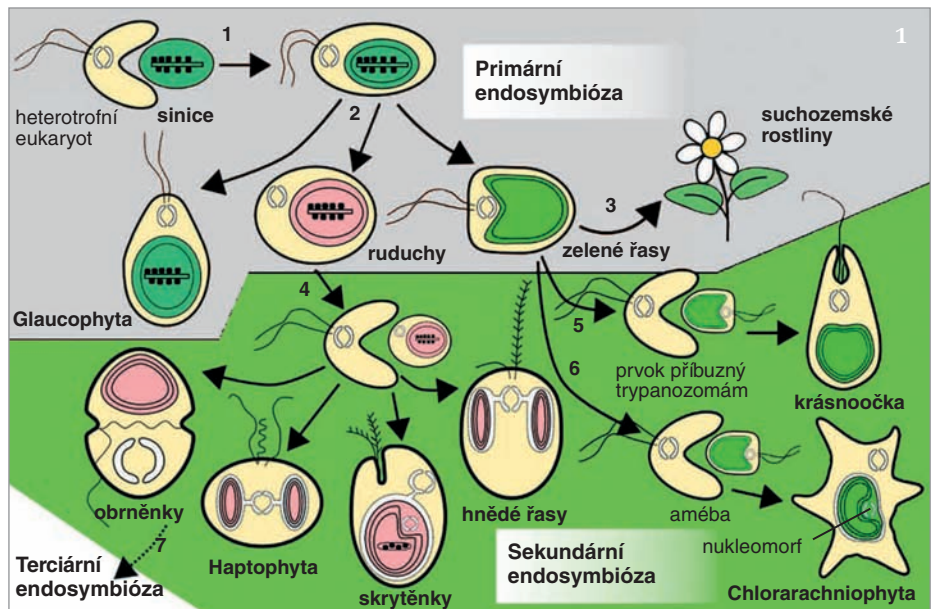
Co je to tedy řasa?

Abychom si vysvětlili, jak vznikly řasy, musíme začít u vzniku fotosyntézy. Tuto schopnost spočívající ve změně energie světla na chemickou získaly některé mikroorganismy v dávné minulosti (někdy před 3,4 miliardami let, Olson 2006). Jejich fotosyntetické systémy však byly zřejmě anoxygenní, neprodukovaly kyslík. Prvními fotosyntetickými organismy produkujícími kyslík se staly sinice – skupina bakterií, které si odhadem před 2,8 miliardami let (podle Olsona 2006) vytvořily vlastní fotosyntetický aparát. Vzhledem k jejich bakteriální stavbě buněk nevznikly v sinicích chloroplasty, ale tylakoidy – systém váček naplněný fotosyntetickými barvivy. Právě díky sinicové oxygenní fotosyntéze se začalo v zemské atmosféře zvyšovat procentuální zastoupení kyslíku. Objevením kyslíku v atmosféře vlastně odstartovalo to, co ve výsledku vedlo také ke vzniku řas. Protože většina organismů žijících v době, kdy sinice „objevily“ fotosyntézu, byla obligátně anaerobní, představoval pro ně kyslík produkovaný činností sinic jed. Sinicím je právě tak přisuzováno, že jsou zodpovědné za jedno z největších vymírání v dějinách naší planety. V reakci na toxické působení kyslíku na eukaryotické obligátně anaerobní mikroorganismy pravděpodobně došlo ke vzniku mitochondrií ze skupiny alfa-proteobakterií z příbuzenského

okruhu rodu *Rickettsia*, a to v procesu označovaném endosymbiózou. Díky tomu anaerobní eukaryota dokázala využít schopnosti alfa-proteobakterií zpracovávat kyslík tak, že je pohltila a získala evoluční výhodu.

Myšlenku endosymbiotického vzniku některých organel formuloval ruský lichenolog Konstantin Sergejevič Merežkovskij (1855–1921) se svou hypotézou o vzniku chloroplastů endosymbiózou sinic. Teorii endosymbiózy však nejvíce zpopularizovala americká bioložka Lynn Margulisová (1938–2011); o svých teoriích napsala knihu, která vyšla v českém překladu Symbiotická planeta. Nový pohled na evoluci (Academia, Praha 2004). Endosymbiotická teorie ve zkratce říká, že chloroplasty a mitochondrie existovaly původně jako samostatně žijící bakterie, eukaryotní buňky je pak v průběhu času asimilovaly. To také vysvětluje, proč zůstávají chloroplasty a mitochondrie do jisté míry nezávislé na buňce (např. se rozmnožují dělením jako bakterie) a označujeme je semiautonomní organely. A teď už se dostáváme k odpovědi, jak vlastně vznikly řasy.

Řasy vznikly v dávné minulosti Země tak, že eukaryotická buňka již se získanými mitochondriemi pozřela sinicovou buňku – a to prostřednictvím fagocytózy. Pozřenou buňku však „nestrávil“ a společnou koevolucí těchto dvou organismů se ze sinice stala buněčná organela – plastid. Opět šlo o endosymbiózu, kterou obecně označujeme jako primární (obr. 1). Důkazy endosymbiotického původu plastidů jsou především jejich semiautonomita a také obal tvořený dvěma membránami – obě membrány jsou sinicového původu, fagozom, kterým byla pohlčená sinice obalena, zanikl. Z eukaryot s takto získaným endosymbiontem se vyvinuly tři skupiny řas – zelené řasy v širším slova smyslu (Chlorophyta, Streptophyta), ruduchy (Rhodophyta) a Glaucophyta. V současném pojetí eukaryotického systému jsou tato řasová oddělení součástí skupiny Archaeplastida, jejíž název reflektuje, že jde o skupinu organismů s nejstaršími plastidy. Do Archaeplastida samozřejmě patří i suchozemské rostliny, které se vyvinuly ze zelených řas. Zelené řasy a ruduchy představují běžně známé, téměř všudypřítomné skupiny řas. Naproti tomu Glaucophyta nemají zásadní ekologickou roli (v našich podmínkách je nejde především v rašeliníštích), ale zajímavé jsou z hlediska evolučního. Glaucophyta ve svých buňkách neobsahují plastidy, jaké známe z ostatních řasových skupin, jejich fotosyntetická organela se nazývá cyanela. Je to miliardu let stará semiautonomní organela plně podřízená hostitelské buňce, s výraznou genomovou redukcí (potud znaky typického plastidu), která ale má zachovanou gramnegativní stěnu (jako sinice). Cyanely se od chloroplastů liší biochemicky i ultrastrukturně, obsahují pouze chlorofyl a, fykobilizomy (světlosběrné antény), karboxyzomy (pro fixaci uhlíku v procesu fotosyntézy) a koncentrické tylakoidy (membránové váčky s fotosyntetickým aparátem). Uvedené znaky společně s peptidoglykanovou buněčnou stěnou naznačují větší podobnost těchto organel k sinicím než k „moderním“ chloroplastům. Proč



tedy na základě těchto znaků nepovažujeme cyanely za symbiotické sinice žijící uvnitř eukaryotických buněk? Existují dva důkazy, že cyanely již nejsou volně žijící sinice, ale organely – cyanely nejsme schopni kultivovat bez jejich hostitele, na rozdíl třeba od symbiotických sinic v lišejníku, navíc mají genom redukováný zhruba na třetinu oproti genomům ostatních sinic.

Kdybychom se při charakterizování řas věnovali jenom primární endosymbióze, mohlo by se zdát, že existovala jakási „praprařasa“ (která vznikla z eukaryota, jenž pohltil sinici) a z ní se vyvinuly ostatní řasy. Skutečnost je však rozdílná – endosymbióza se v evoluční historii zopakovala ještě několikrát, s tou výjimkou, že již nebyla pohlčena sinice, ale jiná řasa. Endosymbiotické děje nám tedy ukazují jasný postup evoluce a že organismy, které dnes označujeme souhrnně jako řasy, neměly nikdy společného předka. Jde o několik na sobě nezávislých evolučních událostí se stejným výsledkem – vznikem fotosyntetického organismu.

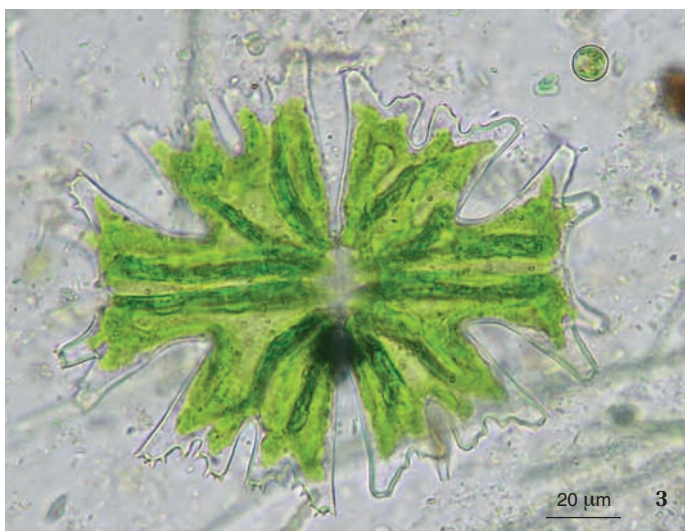
Při sekundární endosymbióze (blíže viz obr. 1), která proběhla v evoluci minimálně třikrát, vznikly ostatní řasové skupiny. Pohlčením ruduchy získaly své chloroplasty hnědé řasy (Ochromphyta, Stramenopila, někdy také Chromophyta), skrytěnky (Cryptophyta), obrněnky (Dinophyta) a Haptophyta. K pohlčení zelené řasy došlo dvakrát nezávisle na sobě, poprvé ji pozřel prvek příbuzný současným trypanozomám, a tak vznikla krásnoočka (Euglenophyta), podruhé to byla měňavka a tento endosymbiotický svazek dal vzniknout zvláštní skupině Chlorarachniophyta – měňavkovitým nebo bičíkatým mikroorganismům schopným fotosyntézy, avšak současně aktivně lovcím bakterie, drobné bičíkovce a eukaryotní řasy. Mixotrofní způsob výživy – spojení autotrofie a heterotrofie – je u řas se sekundárními chloroplasty poměrně běžný a vyskytuje se napříč skupinami.

Můžeme si položit otázku, jak to, že v uvedených případech nejde o další primární endosymbiózy ze sinicemi? Odpověď poskytne ultrastruktura stavba sekundárních plastidů, které mají čtyři

1 Endosymbiotický proces se v evoluční historii odehrál několikrát – zde schéma endosymbiózy vedoucích k chloroplastům, nikoli k mitochondriím. Poprvé dala sinice pohlčená heterotrofním eukaryotem (1) vznik zeleným řasám, ruduchám a skupině Glaucophyta (2). Ze zelených řas se později vyvinuly suchozemské rostliny (3). Později se podobně uskutečnily další endosymbiotické události, do kterých však nevstupovala sinice, ale zelené řasy nebo ruduchy. V případě pohlčení ruduchy (4) nemáme jistotu, kolikrát k této události došlo. Tato endosymbióza dala vzniknout chloroplastům hnědých řas, skrytěnek, obrněnek a skupině řas Haptophyta. Endosymbióza spojená s pohlčením zelené řasy proběhla v evoluci dvakrát: poprvé pozřel předek současných trypanozom zelenou řasu (5) a dal tak vzniknout krásnoočkům, podruhé byla zelená řasa pozřena amébou ze skupiny Cercozoa (Rhizaria, 6) a vznikly fotosyntetické organismy ze skupiny Chlorarachniophyta. Zvláštní kapitolou jsou obrněnky se schopností vstupovat do terciární endosymbiózy, kdy své chloroplasty doplňují dalšími – získanými z řas se sekundárními chloroplasty (7). Podle P. J. Keelinga (2005), orig. J. Juráš

membrány – dvě spodní odvozené od sinice, třetí je plazmatickou membránou symbionta a čtvrtá fagocytickým váčkem. U některých skupin (např. u krásnooček nebo Chlorarachniophyta) jedna z membrán, pravděpodobně ta třetí, zanikla. Druhým důkazem, že nešlo o sinici, ale o řasu, která hrála hlavní roli v procesu sekundární endosymbiózy, je přítomnost nukleomorfu (organely uložené mezi membránami, viz obr. 1) uvnitř chloroplastů u některých skupin řas (mimo jiné u skrytěnek a Chlorarachniophyta). Metody molekulární biologie a čtení sekvencí DNA dokázaly, že nukleomorfy představuje pozůstatek jádra fagocytované řasy, avšak s redukováným genomem.

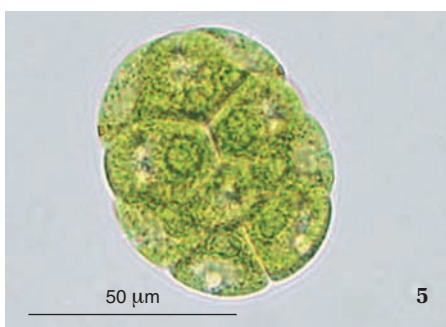
Hlavní řasová oddělení vznikla skutečně buď primární, nebo sekundární endosymbiózou. Ve skutečnosti je toto téma poněkud komplikované, ale o to zajímavější.



U primární endosymbiózy vedoucí k chloroplastům se dlouho předpokládalo, že jde o tak zásadní evoluční událost, že proběhla v historii Země pouze jednou. Dnes víme, že k ní došlo minimálně dvakrát – podruhé tak získala cyanely měňavka *Paulinella chromatophora* (skupina SAR, kmen Rhizaria, obr. 4), což jen ukazuje míru naší znalosti, nebo spíše neznalosti mikroorganismů. Obrněnky jsou navíc schopny „ulovit“ řasu s již sekundárním chloroplastem, začlenit ji do svých buněk a přeměnit na chloroplast – proces označujeme terciární endosymbióza. Tímto způsobem získává své chloroplasty např. mořský rod *Dinophysis* (pohlčením skrytěnky nebo haptofytní řasy), *Gymnodinium* (z haptofytní řasy) nebo *Kryptoperidinium* (z rozsivky). Poslední zajímavostí jsou kleptoplastidy, v českém překladu „ukradené plastidy“, které získávají některé obrněnky a mořští plži, a také nálevníci a katablepharidi (rod *Hatena*) – příbuzní skrytěnek, pozřením řasy, jejího natrávení s tou výjimkou, že si na nějakou dobu ponechají její plastidy, které však nakonec také stráví.

Přenesení do učebnic

Sinice se dají z tohoto pohledu jednoduše uchopit a mohou se stát součástí látky věnované bakteriím. U řas je situace poněkud komplikovanější, o to víc, že jsou středoškolské učebnice do jisté míry zatíženy opisováním a opakováním různě důležitých faktů z jiných starších učebnic (rozmnožování rozsivek spojené se zmenšováním jejich schráněk představuje jistě zajímavou variaci nepohlavního rozmnožování, avšak o tom, že z rozsivek vznikla ložiska ropy, už většina autorů mlčí; že je *Volvox* vlájkovou řasou učebnic, má jistě své opodstatnění, díky jeho zajímavé buněčné organizaci a fyziologii, ale často uváděný váleč koulivý se v naší řasové flóře vyskytuje velmi vzácně atd.). To se promítá i do názoru na řasy, kdy je některé učebnice uvádějí jako podříši rostlin, označovanou nižší nebo stélkaté rostliny (Thallobionta), jiné učebnice již zmiňují skupinu Chromista včetně zařazení řasových oddělení. Vše navíc do určité míry komplikuje nejednotnost výuky tohoto tématu napříč školami – některé stále učí stélkaté rostliny, někde přidávají Chromista, jinde dokonce probíhá výuka podle nového systému velkých eukaryotních říší. Jak však podat studentům



tům komplexní látku, jako jsou např. řasy, ale také prvoci a houby spolu s houbovými organismy? Jak vlastně charakterizovat řasy? Pojmout řasy jako jedno téma, nebo se jim věnovat v průběhu celé výuky biologie v závislosti na tom, o jak velké eukaryotické skupině se právě zmiňujeme?

Hlavní je ujasnit si, co jsou to vůbec řasy – proto si dovoluujeme uvést následující charakteristiku této komplexní skupiny. Vzhledem k neexistenci společného předka všech řasových oddělení představují řasy buď biologickou skupinu se společnými vlastnostmi, jako je organizace jejich těla na úrovni stélky, schopnost fotosyntézy (tu měly ve své minulosti všechny řasy, některé ji však v průběhu své evoluce ztratily a přešly na jiný způsob výživy, včetně parazitismu), nebo se můžeme na řasy dívat jako na skupinu ekologickou, kdy si jednotlivá řasová oddělení vytvořila podobné ekologické adaptace a osídlila podobné biotopy. Rozhodně není již možné považovat řasy za skupinu taxonomickou, protože tento pohled předpokládá, že všechny současné i vyhynulé řasy vznikly jako potomci jedné „prařasy“.

Co se zařazení do výuky týká, je podle našich zkušeností důležité dívat se na skupiny typu řas, ale také prvoků a hub, jako

2 Sinice získaly schopnost fotosyntézy zhruba před 2,8 miliardami let (Olson 2006). V dnešní době je najdeme prakticky všude, jedinými biotopy, které nedokázaly osídlit, jsou stanoviště s výrazně nízkým pH. Vlákenné sinice rodu *Oscillatoria*, běžná součást bentického prostředí stojatých vod

3 Některé skupiny řas se ekologicky specializovaly, jako např. krásivky (skupina z oddělení Streptophyta, blízké příbuzná známé vláknité řasy rodu *Spirogyra*). Tyto řasy, časté dominanty rašelinných biotopů, jsou typické svou symetrickou stavbou buněk, tvořených dvěma půlbuňkami (semicelami). Na snímku *Micrasterias americana* – velmi estetická řasa, která je běžnou součástí rašelinných biotopů.

4 Příkladem opakování primární endosymbiózy – tedy pohlčení sinice eukaryotickou buňkou – je prvok *Paulinella chromatophora*. Můžeme ho najít v drobných vodních tělesech. Studie dokázaly, že část genetické informace ze sinice byla přenesena do jádra prvoka horizontálním přenosem genů (viz Živa 2006, 1 a 2).

5 V učebnicích uváděný váleč koulivý (*Volvox globator*) je zajímavým příkladem komplexní cenobiální řasy, avšak v přírodě nejde o běžného zástupce zelených bičíkatých řas. Mnohem častěji se vyskytuje jemu příbuzná řasa rodu *Pandorina* (na obr.), kterou najdeme ve většině úživných rybníků. Snímek J. Kaštovského

na skupiny ekologické, a učit je jako jeden celek, avšak vždy spolu se zmínkou o novém pohledu na systém eukaryot a zdůrazněním, že jde o „ekologické/biologické skupiny organismů napříč eukaryotním systémem“. Výuka podle nového systému zařazující velké skupiny může díky rozložení do 3–4 let studia biologie vést k tomu, že studenti uslyší o řasových odděleních v prvním, pak možná ke konci druhého a ve třetím ročníku, a nedostanou tak možnost se kriticky podívat na tuto skupinu jako na umělý konglomerát organismů, které však spojují ekologické a biologické znaky.

V navazujícím článku na str. CXXXIII kuléru této Živy představujeme skupiny zahrnující řasy podle aktuálních poznatků o fylogenetickém systému organismů.