

Když sníh zčervená, aneb co (ne)víme o sněžných řasách

Linda Nedbalová, Jaromír Lukavský

I v našich horách můžeme obvykle od druhé poloviny dubna až do července pozorovat nápadný fenomén známý především z polárních a vysokohorských oblastí, tzv. barevné sněhy. Červené, zelené či oranžové zbarvení je způsobeno intenzivním růstem specializovaných autotrofních mikroorganismů, které obecně nazýváme sněžné řasy. Výjimečně byl pozorován i modrý sníh, jehož původcem mohou být drobné kokální sinice. Koncentrace buněk v barevném sněhu dosahuje statisíců až milionů buněk v jednom mililitru roztátého sněhu. Sněžné řasy se musely v průběhu svého vývoje přizpůsobit růstu v podmínkách teplot blízkých nule a za vysoké intenzity záření.

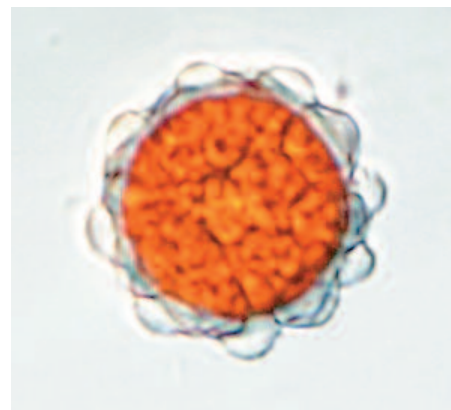
Historie pozorování barevného sněhu

Barevné sněhy jsou natolik nápadným jevem, že první písemnou zmínku najdeme již v Aristotelově spisu *Meteorologica*. Řadu pozorování v různých oblastech světa přinesly objevitelské cesty v průběhu novověku. J. Davis v r. 1585 pozoroval červená sněhová pole v průlivu mezi Grónskem a Baffinovým ostrovem, který dnes nese jeho jméno, ze druhé poloviny 17. stol. pochází zmínka ze souostroví Špicberky. Poměrně starého data jsou i první doklady o výskytu barevného sněhu z Vysokých Tater (J. Buchholz 1751, Mengusovská dolina), přibližně ve stejném období tento jev zaznamenal známý badatel H. B. Saussure v oblasti Alp. V r. 1835 si Ch. Darwin si při svém přechodu And povšiml, že stopy mezků ve sněhu červenají. Postupně pak následovala pozorování z dalších kontinentů — z Afriky (1843, Atlas), vnitrozemí Severní Ameriky (1858, Cascade Mts.), Antarktidy (1902) a později i z mnoha dalších oblastí, včetně exotických lokalit, jako jsou třeba tropické ledovce Nové Guiney či pohoří Nového Zélandu.

Historie sledování výskytu sněžných řas v České republice je poměrně krátká. Až v květnu 1976 byl červený sníh poprvé nale-

zen v Labském dole v Krkonoších (Schustlerova zahrádka). Pátrání po do té doby neznámém barevném sněhu v Krkonoších inicioval geobotanik Jan Jeník, který správně předpokládal, že toto pohoří splňuje všechny podmínky pro růst sněžných řas a není tedy důvod, proč by se zde neměly vyskytovat. To se potvrdilo i v dalších letech, kdy byl červený sníh pozorován i na dalších lokalitách v bezlesí a kdy byl v Labském dole poprvé zjištěn zeleně zbarvený sníh. Od té doby pozorují pracovníci Správy KRNAP sněžné řasy v Krkonoších ve větší či menší míře v závislosti na sněhových podmínkách každoročně. Je zajímavé, že o barevném sněhu v oblasti člověkem tak intenzivně využívané neexistuje žádný písemný doklad ani ústní informace z dřívějšího období. Přitom není pravděpodobné, že by se sem sněžné řasy rozšířily teprve nedávno. Na rozdíl od rozsáhlých červeně zbarvených sněhových polí vysokohorských a polárních oblastí však v Krkonoších většinou najdeme pouze velmi malé plochy červeného sněhu (řádově cm²) a navíc mají tyto skvrny často jen krátké trvání. Mnohem běžnější zelený sníh je zase poměrně nenápadným jevem, který mohl dlouhou dobu nepoučeným pozorovatelům

Zelený sníh v Dlouhém dole v Krkonoších



Trvalá spora z okruhu Chlamydomonas nivalis s výrazně strukturovanou buněčnou stěnou. Červené zbarvení je způsobeno akumulací sekundárního karotenoidu astaxanthinu. Zdá se, že výskyt tohoto typu buněk v Evropě je vázán převážně na severské oblasti, v Krkonoších ani v Alpách zatím nebyl pozorován. Národní park Dovrefjell, Norsko

unikat. Tak byl krátce po nález v Krkonoších zjištěn výskyt zeleného sněhu na Šumavě u Plešného jezera (viz článek J. Lukavského, Živa 1993, 1: 4–5). Výsledkem našeho cíleného průzkumu vybraných lokalit v masivu Králického Sněžníku, v Jeseníkách, Orlických a Jizerských horách, který se uskutečnil na jaře r. 2006, jsou první nálezy sněžných řas pro všechna tato pohoří. Zdá se tedy, že barevné sněhy jsou v České republice častější, než se dříve předpokládalo, jejich podrobnější taxonomický a ekologický výzkum však zatím proběhl pouze v Krkonoších.

Co uvidíme v barevném sněhu pod mikroskopem?

Staré kroniky se o barevném sněhu zmiňují jako o božím varování, nebo se věřilo, že indikuje místa, kde vycházejí na povrch rudné žíly. Poté se dlouhou dobu předpokládalo, že zbarvení sněhu způsobují anorganické částice, např. prach z okolních skal. Až v 19. stol. mikroskopování barevného sněhu odhalilo, že původcem jeho zbarvení jsou mikroorganismy. V r. 1896 švýcarský algolog R. Chodat jako první rozpoznal, že zbarvení je způsobeno intenzivním růstem mikroskopických řas. Po urči-



tých taxonomických peripetiích pak norský badatel N. Wille popsal v r. 1903 nejčastějšího původce červeného sněhu — bičíkovce *Cblamydomonas nivalis*.

Z taxonomického hlediska můžeme ve sněhu pod mikroskopem pozorovat široké spektrum druhů od sinic (*Cyanobacteria*) přes obrněnky (*Dinophyta*), skrytěnky (*Cryptophyta*), zlativky (*Chrysophyceae*), rozsivky (*Bacillariophyceae*), různobrvky (*Xanthophyceae*) a zejména zelené řasy (*Chlorophyta*). Celkově se společenstvo organismů žijících ve sněhu označuje jako kryoseston. Mezi pravé sněžné řasy však patří poměrně malé množství druhů zelených řas s převahou bičíkovců z rodů *Cblamydomonas*, *Chloromonas* a *Chlainomonas* (z řádu *Cblamydomonadales*) a nepohyblivých druhů z rodů *Raphidonema* a *Koliella* (z třídy *Trebouxiophyceae*).

Pokud je teplotní optimum růstu těchto organismů posunuto do oblasti nízkých teplot, označujeme je jako psychrofilní. Předpokládá se, že zejména v případě bičíkovců jde o úzce specializované organismy, jejichž masivní růst je vázán pouze na prostředí sněhu. Pokud jde o vláknité druhy ze třídy *Trebouxiophyceae*, ukazuje se v poslední době, že některé druhy jsou pravděpodobně půdní. Sníh kolonizují až sekundárně a jejich vysoká koncentrace vedoucí k zabarvení sněhu může být dána pasivní akumulací způsobenou odtáváním. Ve sněhu často najdeme v malém množství i řadu doprovodných druhů, jejichž teplotní optimum je však vyšší (psychrotrofní druhy), sníh pro ně není ideálním prostředím k růstu, a proto obvykle nedosahují vysokých koncentrací nutných k vegetačnímu zabarvení (běžně např. zástupci rodu *Stichococcus*). První monografii kryosestonních řas publikovala v r. 1968 maďarská algoložka E. Kol, která se studiu sněžných řas věnovala celý život. Výsledkem její práce byl průzkum kryoflóry lokalit po celém světě (evropská pohoří, národní parky USA, Grónsko, Špicberky, Antarktida, tropické ledovce Nové Guiney), popis mnoha nových druhů a rodů, klasifikace biotopů sněžných řas a první pokusy o nástin biogeografie sněžných řas.

Ve sněhu samozřejmě najdeme i jiné organismy než řasy a sinice. Ačkoli v případě prostředí sněhu lze jen stěží mluvit o komplexních potravních sítích, mohou početné

Cihlově červený sněh v Labském dole v Krkonoších



populace sněžných řas sloužit jako zdroj potravy pro nálevníky (*Ciliata*), vířníky (*Rotatoria*), kroužkovce (*Annelida*) či chvostokoky (*Collembola*). Velmi často můžeme ve vzorcích sněhu pozorovat dva typy houbových organismů, které jsou tradičně označovány jako *Chionaster nivalis* a *Selenotila nivalis*. Přestože jde v podstatě o běžné se vyskytující druhy, jejich životní cykly a ekologie nejsou dosud vůbec prozkoumány, sporné je i jejich taxonomické zařazení. Ve sněhu se samozřejmě vyskytují i bakterie. Byla prokázána pozitivní korelace mezi počtem sněžných řas a bakteriálních buněk, jejichž růst může být stimulován extracelulárními produkty řas.

Životní cykly sněžných řas

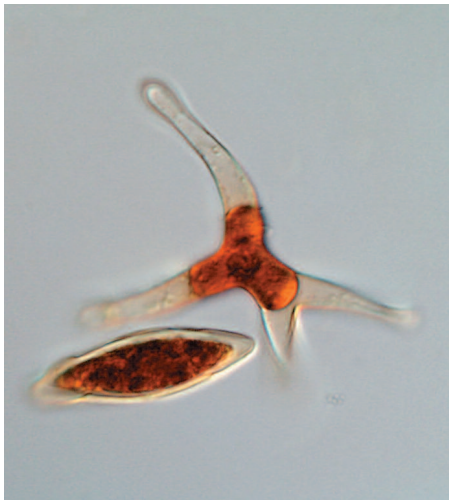
Sněžné řasy z řádu *Cblamydomonadales* se vyznačují poměrně komplikovanými životními cykly, které jsou považovány za jednu z jejich četných adaptací k extrémním podmínkám prostředí. K jejich objasnění nejvíce přispěl americký algolog R. Hoam, který podrobně studoval populace vybraných druhů v terénu a tyto výsledky zkombinoval s údaji získanými při studiu laboratorních kultur. Důležitou charakteristikou těchto druhů je schopnost tvorby odolných nepohyblivých buněk („trvalých stadií“ v rámci životního cyklu, v angličtině resting stages) s tlustou buněčnou stěnou,

Zdále viditelné sněhové pole zvané Mapa republiky na svahu Studniční hory v Krkonoších vytrvává pravidelně až do letních měsíců, kdy se zde objevují sněžné řasy. V případě srážkově bohaté zimy se zde může nasbromáždit až 15 m sněhu. Foto z 29. července 2005

kteří jsou schopny přežít nepříznivé podmínky prostředí. Za příznivých podmínek se opět mění v bičíkaté buňky, které mohou v prostředí mokrého jarního sněhu aktivně migrovat, a tak vyhledat nejvýhodnější podmínky k růstu. Bičíkovci představují aktivně rostoucí vegetativní stadium. Za určitých podmínek pak dochází ke tvorbě gamet a ke kopulaci, jejímž výsledkem jsou trvalé buňky označované jako zygospor. U některých druhů mohou trvalá stadia vznikat nepohlavní cestou. V podmínkách periodických sněhových polí se tyto buňky dostávají po roztátí sněhu na povrch půdy. V zimním období pak přežívají pod sněhovou pokrývkou a probouzejí se, až když na jaře nastanou vhodné podmínky k růstu. Obecně lze říci, že se bičíkovci vyskytují poměrně krátkou dobu a ve vzorcích barevného sněhu většinou najdeme pouze trvalé buňky. Proto bylo velké množství těchto bičíkovců původně popsáno na základě morfologických znaků často

Červený sněh v Malé Kotelní jámě v Krkonoších. Foto M. Kociánová, KRNP





Trvalá spora druhu *Chloromonas rosae* v. *psychrophila* a houbový organismus tradičně označovaný jako *Chionaster nivalis*, který často doprovází populace sněžných řas

výrazně strukturované buněčné stěny jako kokální řasy z rodů *Scotiella*, *Cryocystis*, *Trochiscia* a dalších. Ačkoli už známe průběh životních cyklů řady druhů zejména z rodu *Chloromonas*, dosud se nepodařilo objasnit, jaké faktory tyto cykly řídí, např. za jakých podmínek dochází ke klíčení spor nebo co naopak indukuje vznik trvalých stadií.

Na rozdíl od předchozí skupiny neznáme u sněžných řas z rodů *Raphidonema* a *Koliella* žádná trvalá stadia a chybějí jim i další adaptivní rysy známé u sněžných bičíkovců. Určování druhů v rámci tohoto komplexu velmi komplikuje skutečnost, že morfologii buněk výrazně ovlivňují nejrůznější podmínky prostředí, jako např. teplota nebo koncentrace živin. Např. kultivací řasy *Raphidonema nivale* v různých kombinacích podmínek se podařilo vypěstovat buňky morfologicky podobné řadě jiných kryosestonních druhů.

Adaptace sněžných řas na extrémní podmínky prostředí

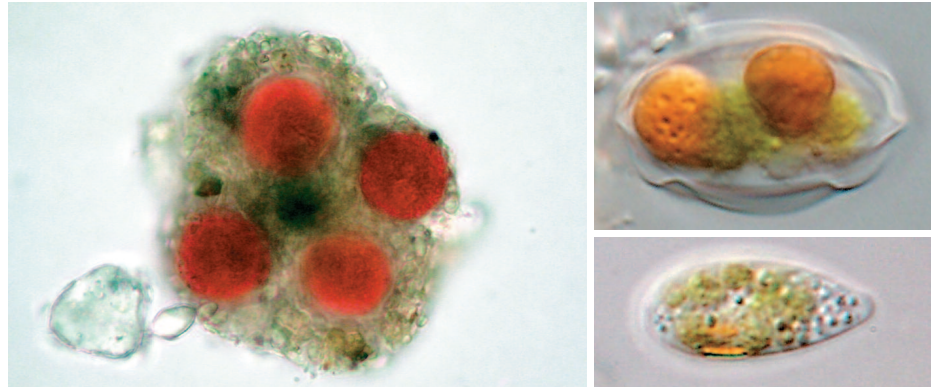
Kromě komplikovaných životních cyklů se sněžné řasy vyznačují přítomností řady dalších adaptací, které jim umožňují úspěšný růst v extrémních podmínkách tajícího sněhu. Bezpochyby nejnápadnější z těchto adaptací je akumulace karotenoidů v buňkách. Nejznámější z nich — astaxanthin — je příčinou intenzivně červeného zbarvení sněžových polí. Bylo prokázáno, že astaxanthin jako pasivní filtr účinně brání buňky proti následkům nadměrné intenzity krátkovlnného viditelného a také ultrafialového záření (maximum jeho absorpce leží v modré oblasti). Tím však role astaxanthinu nekončí. Tato látka je známa svými silnými antioxidantními účinky a poskytuje tedy buňce také aktivní ochranu před volnými radikály, které mohou vznikat jako důsledek stresu z nadměrného ozáření. V neposlední řadě pak vysoká koncentrace astaxanthinu zvyšuje odolnost buněk vůči mrazu.

Některé druhy nevytvářejí astaxanthin, ale jiné karotenoidy, jejich složení je však dosud málo prozkoumáno. Kromě karotenoidů byly v buňkách sněžných řas nalezeny také zvýšené koncentrace jiných látek s antioxidantními účinky, jako např. fenolických sloučenin nebo α -tokoferolu (vitami-

nu E). V případě, že jsou ve sněhu přítomni bičíkovci, je účinnou ochranou proti působení nadměrného ozáření migrace do hlubších vrstev sněhové pokrývky. Tento jev jsme měli možnost pozorovat na lokalitě Ladové pleso ve Vysokých Tatrách. Červeně zbarvení bičíkovci z okruhu *Chlamydomonas nivalis* tvořili výraznou barevnou vrstvu asi 1 cm pod povrchem sněhu, kde je intenzita záření již významně snížena. Po odstranění této svrchní vrstvy sněhu došlo během několika málo minut k opětovnému přemístění bičíkovců do vrstvy, která byla zřejmě za daných podmínek bezpečná z hlediska možného poškození nadměrnou intenzitou záření.

Při nízkých teplotách je pro přežití buňek zásadní udržení membrán ve funkč-

nomického postavení různých polárních a horských populací je nutné další studium kultur, které však komplikuje obtížná izolace z přírodního materiálu. Nicméně ekologické nároky druhů tohoto komplexu jsou zřejmě velmi podobné, charakteristická je zejména vazba na podmínky bezlesí, a tedy velká odolnost k vysokým intenzitám záření. V Evropě tak tvoří dominantu kryosestonu vysokých pohoří, jako jsou Alpy, Vysoké Tatry, Rila, Pirin atd. V České republice jsou lokality tohoto vysokohorského druhu dosud známy pouze z Krkonoš, kde se sice na malých plochách, ale pravidelně vyskytuje především v alpínském pásmu na Luční a Studniční hoře. To podtrhuje výjimečnost Krkonoš mezi českými a moravskými pohořími.



ním, neztuhlém stavu. V trvalých buňkách sněžných řas z okruhu *Chlamydomonas nivalis* nasbíraných na ostrově Hermit (Antarktida) byl stanoven vysoký podíl nenasycených mastných kyselin, které snižují bod tuhnutí membránových lipidů. Analýzou složení mastných kyselin přírodní populace bičíkovců *Chloromonas brevispina* z blízkého okolí jezera Laka na Šumavě bylo zjištěno, že nenasycené mastné kyseliny byly také výrazně převažující složkou (97 %).

Rozšíření a ekologie

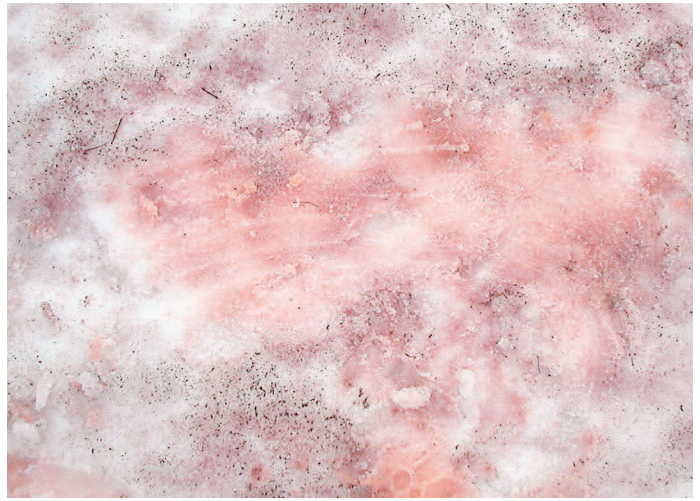
I když není studium rozšíření a ekologie sněžných řas ani zdaleka uzavřenou kapitolou, pokusíme se shrnout některé dosavadní poznatky. Dominantní druhy kryosestonu jsou obvykle považovány za kosmopolitní. Předpokládá se, že se buňky sněžných řas mohou šířit větrem na velké vzdálenosti. Důkazy však chybějí a proti dálkovému transportu jako efektivnímu mechanismu šíření mluví i fakt, že řada druhů je prokazatelně omezena jen na určité území.

Tradičně se uvádí, že nejrozšířenějším druhem je již zmíněný *Chlamydomonas nivalis*, který způsobuje červené zbarvení sněhu běžně v polárních a vysokohorských oblastech po celém světě. Ve vzorcích červeného sněhu jsou však ve většině případů přítomny pouze cysty s hladkým povrchem, jejichž buněčný obsah je zcela překryt astaxanthinem (viz výše) a jakákoli determinace na základě morfologických znaků je tedy v podstatě nemožná. V současné době už víme, že *Chlamydomonas nivalis* je komplexem, který sdružuje více druhů s podobnými nepohyblivými buňkami. Například některé populace ze Severní Ameriky již byly na základě studia bičíkovců z laboratorní kultury přerazeny do druhu *Chlamydomonas augustae*. Pro ujasnění taxo-

Nepohyblivé buňky Chlamydomonas nivalis jsou někdy obaleny silnou vrstvou detritu, vlevo ♦ Zygospora (vpravo nahoře) a bičíkovec (vpravo dole) druhu Chloromonas nivalis, který je podle současných poznatků nejrozšířenější sněžnou řasou v České republice

Významnou skupinou sněžných řas jsou druhy z rodu *Chloromonas*. Díky poměrně výraznému morfologickému rozrůznění trvalých buněk v porovnání s komplexem *Chlamydomonas nivalis* je determinace snazší, nicméně studium diverzity sněžných chloromonád také ještě není zdaleka uzavřeno. Např. v r. 2006 byly ze Severní Ameriky na základě kombinace morfologických a molekulárních dat popsány dva zcela nové druhy: *Chloromonas chenangoensis* a *Ch. tugbillensis*. Bičíkovci a nezralá trvalá stadia chloromonád způsobují zelené zbarvení sněhu; žlutozelené, oranžové, růžové či cihlově červené zbarvení indukuje obvykle přítomnost trvalých buněk v různém stupni zralosti. Obecně je možné shrnout, že výsledná barva sněhu závisí především na třech faktorech: přítomném druhu či druzích, stadiu životního cyklu a na stupni expozice vůči slunečnímu záření. V České republice jsou chloromonády nejčastějším původcem barevného sněhu, který se v závislosti na konkrétních podmínkách v daném roce obvykle poprvé objevuje přibližně v druhé polovině dubna. Se stoupající nadmořskou výškou či výškou sněhové pokrývky se začátek růstu sněžných řas posouvá do pozdějšího období.

Dlouhodobé sledování výskytu jednotlivých druhů v gradientu nadmořské výšky Krkonoš prokázalo rozdíly v jejich ekologických nárocích. Druh *Chloromonas brevispina*, charakteristický tvorbou silnostěnných ostitých zygospor, je vázán na zastíněné či polozastíněné lokality montánního pásma v nadmořské výšce zhruba

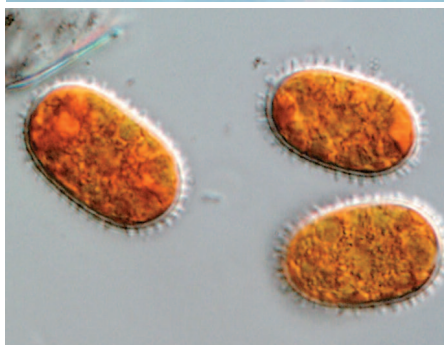
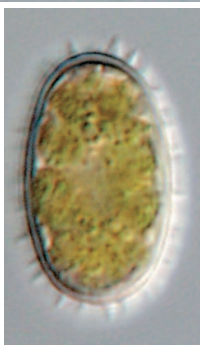
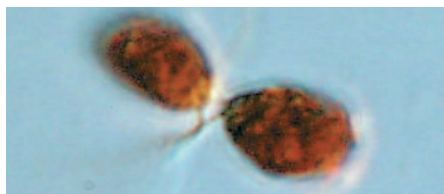
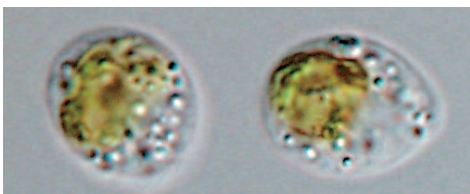


Červený sníh na svahu Luční hory v Krkonoších. Foto M. Kociánová, KRNAP

700–1 250 m. Druhy *Chloromonas nivalis* a *Ch. rosae* var. *psychrophila* vystupují i do alpského stupně v nadmořské výšce nad 1 250 m, kde je v pozdější fázi sezony, tj. obvykle od června až do roztátí posledních sněhových polí, těžiště výskytu vysokohorského druhu *Chlamydomonas nivalis*. Podobné schéma rozšíření druhů v závislosti na nadmořské výšce jsme pozorovali v bulharském pohoří Vitoša. Zdá se tedy, že i v rámci prostředí sněhu došlo ke specializaci na různé typy lokalit, a sněžní bičíkovci tedy nejsou z tohoto hlediska homogenní skupinou.

Nepohyblivé druhy řas z rodů *Raphidoneima* a *Koliella* většinou v našich horách netvoří barevné sněhy a nacházíme je pouze jako doprovodné druhy sněžných bičíkovců. Výjimkou je druh *Koliella tatrae*, který byl dominantou zeleného sněhu v dolině Pod Sikou v Belianských Tátrách. Ekologii tohoto druhu podrobně prozkoumali J. Komárek, F. Hindák a P. Javornický, jejichž práce publikovaná v r. 1973 se stala průkopnickým dílem v oblasti exaktního studia ekologie sněžných řas. Šlo např. o jedno

Bičíkovci druhu Chloromonas brevispina (nahoře a dole vlevo) ♦ Kopulace gamet téhož druhu (nahoře vpravo) ♦ Výsledkem kopulace jsou planozygoty, z nichž se vyvíjejí trvalá stadia — zygospory, které se vyznačují postupnou akumulací karotenoidů (dole uprostřed a vpravo)



z prvních měření primární produkce sněhových polí *in situ*. Kryofilní druh *Koliella tatrae* drží ještě jeden primát — jako první sněžná řasa byl úspěšně kultivován a studován v laboratorních podmínkách. Bylo zjištěno, že vzestup teploty nad 10 °C je pro tento organismus skutečně letální.

Význam studia sněžných řas

Studium diversity sněžných řas komplikuje často špatná dostupnost lokalit a nutnost kombinovaného studia přírodních populací a kultur. Vzhledem k časově velmi omezenému výskytu a citlivosti bičíkovců je obtížné jejich studium v laboratoři (malá změna prostředí většinou způsobí odhození bičíků). Izolace kmenů sněžných řas v laboratorních podmínkách je náročná i z toho důvodu, že dosud přesně neznáme podmínky, které jednotlivé druhy vyžadují k růstu. U zástupců řádu *Chlamydomonadales* nám chybí např. znalost faktorů, které indukují klíčení ve srovnání s bičíkovci často se vyskytujícími trvalých buněk. Z taxonomického hlediska proto po izolacích nových kmenů pravidelně dochází ke korekcím starších údajů založených pouze na morfologických znacích buněk ze zpravidla jednorázových vzorků a stále jsou popisovány nové druhy. Dá se tedy shrnout, že diverzita sněžných řas je dosud nedokonalé prozkoumána. V současné době může být prostředí sněžných řas v některých oblastech ohroženo v souvislosti s globálními změnami klimatu. Citlivé jsou zejména izo-

lované lokality typu tropických ledovců, kde se mohou vyskytovat zajímavé druhy, potenciálně cenné i pro člověka.

Jednou z otázek produktivity sněhových polí. Nedávná měření primární produkce *Chlamydomonas nivalis* v pohoří Rocky Mountains ukázala, že v červeně zbarveném sněhu může denní spotřeba CO₂ dosáhnout nezanedbatelné hodnoty. Když vezmeme v úvahu často velkou rozlohu polí osídlených sněžnými řasami, lze předpokládat, že za příznivých podmínek mohou tato pole v kontextu polárních či horských oblastí spotřebovávat značné množství CO₂.

Podstatné je, že sněžné řasy takto fungují v době, kdy vyšší rostliny jsou ještě pod sněhem, případně v podmínkách trvalých sněžných polí představují jediné primární producenty ekosystému.

Jako typičtí extremofilové se sněžné řasy nabízejí jako modelové organismy pro studium přizpůsobení k životu na hranici fyziologických možností. Předky sněžných řas byly pravděpodobně půdní řasy a adaptace k životu ve sněhu se u dominantní skupiny zelených bičíkovců vyvinula minimálně dvakrát. Dosud není jasné, jakým způsobem je u těchto psychrofilních organismů na molekulární úrovni zajištěna optimalizace fungování fotosyntetických procesů v podmínkách teplot blízkých nule a často za velmi vysoké intenzity záření. Ačkoli obecné mechanismy zajištění fluidity membrán jsou známy, existuje zatím jen malé množství prací, které se zabývají složením mastných kyselin sněžných řas. Z praktického hlediska je zajímavá produkce karotenoidů, mastných kyselin s více nenasycenými vazbami (PUFA) a dalších biologicky aktivních látek, které by mohly být v budoucnu využity v biotechnologiích. Tomu však bude muset předcházet detailní studium těchto látek a vytipování kmenů, které by byly vhodné pro případnou masovou kultivaci.

A na závěr ještě jeden dobrý důvod, proč studovat sněžné řasy — jsou krásné!

Výzkum sněžných řas je podporován juniorským grantem GA AV ČR č. KJB 601110509 a projekty MŠMT 0021620828 a 1M0571. Autoři článku děkují správě KRNAP za umožnění výzkumu v oblasti Krkonoše a zejména M. Kociánové za pomoc při sběru vzorků.