

Nejkyselější, a přesto plné života – příběh Hromnického jezírka

Lokality extremofilních organismů si většina z nás nejspíš představí jako exotická, často velmi obtížně dostupná místa, jako jsou ledové pouště v kontinentální Antarktidě, horké prameny v Yellowstone National Parku nebo hydrotermální průduchy na hlubokomořském dně. Jednu máme ale doslova „za rohem“ a podmínky prostředí jsou tam tak extrémní, že se o ní traduje, že je bez života. Jak je tomu ale doopravdy?

Hromnické jezírko vzniklo zatopením lomu po těžbě pyritických břidlic a nachází se severně od Plzně v přímém sousedství obce Hromnice (obr. 1). Vzniklo 60 m pod úrovní okolního terénu závalem odvodňovací štoly krátce po zastavení těžby před více než 120 lety a jeho hloubka dosahuje až 14 m. Už na první pohled je

zřejmé, že nejde o „obyčejný“ zatopený lom. Načervenalá barva vody odráží její extrémní chemické složení dané specifickým geologickým podložím, v tomto případě vysokou koncentrací železa. Tamní břidlice byly v minulosti díky vysokému obsahu síry (analýzy z dob těžby udávají 3–6 %) velmi cennou surovinou využíva-

Tab. 1 Typy jezer podle pH, pufrčního systému a obsahu iontů. Na základě hodnot pH jsou vymezeny tři kategorie jezer. Jejich pH je stabilizováno pomocí tří hlavních pufrčních systémů. Ve všech kategoriích se vyskytují jak přirozeně vzniklá, tak člověkem vytvořená jezera. Upraveno podle: W. Geller a kol. (1998)

	Koncentrace iontů nízká	Koncentrace iontů vysoká
pH 6–8	jezera s neutrálním pH, uhličitanový pufrční systém	jezera s neutrálním pH, uhličitanový pufrční systém
pH 4,5–5,5	jezera postižená atmosférickou acidifikací, pufrční systém $\text{Al}(\text{OH})_x$	kyselá jezera vzniklá po těžbě nerostných surovin s obsahem síry, pufrční systém $\text{Al}(\text{OH})_x$
	rašelinná jezera, pufrční systém $\text{Al}(\text{OH})_x$ a huminové kyseliny	sopečná jezera, pufrční systém neznámý
pH 2–4	neexistují?	kyselá jezera vzniklá po těžbě nerostných surovin s obsahem síry, pufrční systém $\text{Fe}(\text{OH})_x$
		sopečná jezera s pH 0,9 až 4, pufrční systém $\text{Fe}(\text{OH})_x$ nebo ?



nou pro tehdy celosvětově významnou výrobu dýmavé kyseliny sírové (olea). Není tedy divu, že je voda v jezírku extrémně kyselá – pH v povrchové vrstvě klesá až k hodnotám kolem 2,5, v rámci České republiky rekordním. Podobně rekordní jsou i další chemické parametry, např. koncentrace síranových iontů, nade dnem dosahující až 6 g/l, železa, hliníku nebo jiných kovů. Je zřejmé, že vyrovnat se s takto extrémními podmínkami dokáže jen velmi omezené množství organismů.

Typy kyselých jezer

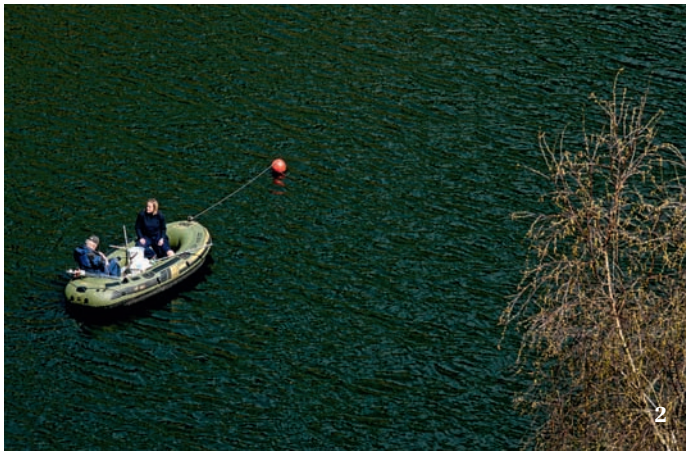
Jezera s nízkým pH vody mohou vznikat různými mechanismy, přirozeně i v důsledku lidské činnosti (tab. 1). Okyselení s sebou přináší vyčerpání uhličitanového pufrčního systému, který udržuje hodnoty pH v poměrně úzkém rozmezí v běžných jezerech s pH kolem neutrální hodnoty (cirkumneutrálních) nezávisle na obsahu iontů. S poklesem pH nastupuje pufrční systém založený na hliníku, v nejkyselějších vodách pak tuto roli přebírá železo. Pro chemismus kyselých jezer je s klesajícím pH klíčové zvýšení rozpustnosti kovů, jejichž koncentrace zde dosahují velmi vysokých hodnot a vytvářejí tak prostředí toxické pro většinu organismů.

Extrémně kyselá jezera vznikají ve vulkanických oblastech, které jsou přirozeným zdrojem velkého množství síry. Jejich pH může klesat až pod hodnotu 1 a běžně se pohybuje v rozmezí 2–4, což doprovázejí velmi vysoké koncentrace síry, železa a dalších prvků. Tento typ jezer najdeme např. v Japonsku, na Novém Zélandu, Kurilských ostrovech nebo v Indonésii.

Mnoho kyselých jezer vzniká zatopením lomů využívaných k těžbě uhlí i jiných nerostných surovin, jako tomu bylo i v případě Hromnického jezírka. Řadu takových jezer najdeme na území východního Německa, kde v posledních desetiletích došlo, ostatně jako v celém tzv. východním bloku, k výraznému útlumu těžby hnědého uhlí, které obsahuje velké množství sulfidů železa a dalších forem síry. Jejich chemismus kromě charakteru podloží závisí na různých faktorech, jako jsou např. stáří jezera, jeho morfometrické charakteristiky nebo vliv přítoků. Některá z nich zůstávají extrémně kyselá (pH 2–4) i desítky let po svém vzniku, řada z nich má neutrální pH už krátce po napuštění. Tento typ jezer se tak stává nepřehlédnutelným rysem naší severočeské krajiny (viz např. Živa 2020, 5: 261–264 a na str. 219–222 tohoto čísla). Příkladem je třeba rozlehlé Kamencové jezero na okraji Chomutova, které je oblíbenou rekreační lokalitou. Ohledně jeho vzniku panují nejasnosti, jisté však je, že patří k jezerům s extrémním chemismem (pH se pohybuje kolem 3).

Dalším mechanismem vzniku kyselých jezer (byť jejich pH neklesá na tak nízké hodnoty jako v předchozích dvou případech) je atmosférická acidifikace způsobená depozicí síranů, oxidů dusíku a amoniaku, pocházejících především z výroby energie a zemědělské činnosti. Kyselé deště ve druhé polovině 20. století zasáhly rozsáhlá území v Evropě a Severní Americe.

1 Celkový pohled na Hromnické jezírko nedaleko Plzně. Foto P. J. Juračka



V jezerech ležících na podloží s nízkou pufruční kapacitou došlo k poklesu pH až k hodnotám kolem 4,5. Nápadným rysem těchto kyselých jezer bylo zvýšení průhlednosti vody kvůli omezení dostupnosti fosforu, který je limitujícím faktorem pro růst fytoplanktonu. Dále je charakteristická vysoká koncentrace toxického hliníku, která způsobila drastické ochuzení bioty včetně vymření ryb. Unikátním souborem takto zasažených lokalit jsou šumavská ledovcová jezera; v některých z nich došlo v důsledku acidifikace dokonce k úplnému vymizení planktonních korýšů. Ve střední Evropě depozice oxidů síry kulminovala v 80. letech a poté razantně klesla díky odsíření uhelných elektráren. Od té doby můžeme pozorovat zotavování jezer, i když je komplikováno tím, že v jejich povodích stále zůstává velké množství znečišťujících látek (především sloučenin síry), které se zde postupně hromadí od počátku průmyslové revoluce. Specifický typ lokalit pak představují rašelinné vody, kde hodnoty pH mohou klesnout pod 4. Toxický vliv hliníku je v nich potlačen vysokou koncentrací rozpuštěných organických látek.

Historie těžby břidlic na místě dnešního Hromnického jezírka

Hromnické „vitriolové“ břidlice využívali lidé patrně už od středověku. První zmínka o těžbě pochází z konce 16. století. Cisterciáckí mniši z nedalekého kláštera v Plasích z nich vyráběli léčivé přípravky a břidlice sloužily také k výrobě kamenice, který se později využíval např. jako bělidlo v textilním průmyslu. Na přelomu 18. a 19. století začala éra výroby kyseliny sírové a z této lokality se stala doslova kolébka českého chemického průmyslu. Nový majitel Johann David Starck se chopil příležitosti, kterou mu v té době poskytovalo ložisko cenné suroviny. Zavedl povrchovou těžbu a zahájil výrobu olea – koncentrované kyseliny sírové (H_2SO_4) s rozpuštěným volným oxidem sírovým (SO_3). Jako jediné tehdy známé rozpouštědlo rostlinného barviva indiga byla dýmavá kyselina sírová mimo jiné nenahraditelná v textilním průmyslu. Výroba probíhala termickým rozkladem síranů, což je nejstarší metoda výroby kyseliny sírové. „Vitriolový kámen“ získaný ve varných pecích byl žihán na bezvodý síran železitý, $Fe_2(SO_4)_3$, který se po rozemletí dále rozkládal pyrolýzou silným zahříváním v keramických retortách, tedy žáruvzdorných nádobách, ve speciálních, galejních pecích. Uvolně-

né plyny s převahou oxidu sírového se zaváděly do samostatné keramické baňky s trochou zředěné kyseliny vně pece neboli předlohy, kde vznikala tzv. česká dýmavá kyselina sírová. Tento způsob výroby byl energeticky velmi náročný a vyžadoval množství dřeva a později uhlí. V okolí závodu bylo proto postupně otevřeno několik uhelných dolů a v jejich blízkosti byly vybudovány tzv. olejny, kde docházelo k finálnímu zpracování vitriolového kamene. Pro úspěch místní výroby byla klíčová i dostupnost vhodných jílu pro výrobu keramických nádob odolných vůči žáru a kyselině, nutných pro vlastní produkci a přepravu výrobků. V 70. a 80. letech 19. století byla firma zpracovávající hromnickou břidlici shodou okolností prakticky monopolním výrobcem olea na světě. V době největšího rozkvětu fungoval v lomu parní těžební stroj a parní drtič. Toto období však netrvalo dlouho. Zavedení kontaktní technologie pro výrobu kyseliny sírové i olea znamenalo rychlý konec hromnického průmyslového závodu, který byl zrušen v r. 1893. Dnes z něj zbývá jen několik budov a jezírko obklopené haldami. Přesto jde o nejzachovělejší lokalitu dokládající historicky významný způsob výroby kyseliny sírové. To byl také důvod pro vyhlášení této lokality přírodní památkou, což umožnilo zachovat ji v jen málo pozměněné podobě.

Podivný svět pod hladinou

Díky výzkumu kolegů z geografické sekce Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy máme o zvláštním prostředí panujícím

2 a 3 Odběr vzorků vody a planktonu. Vzorky z různých hloubek umožňují získat sběrač typu Van Dorn (obr. 2 a 3).

Foto P. J. Juračka (obr. 2 a 3)

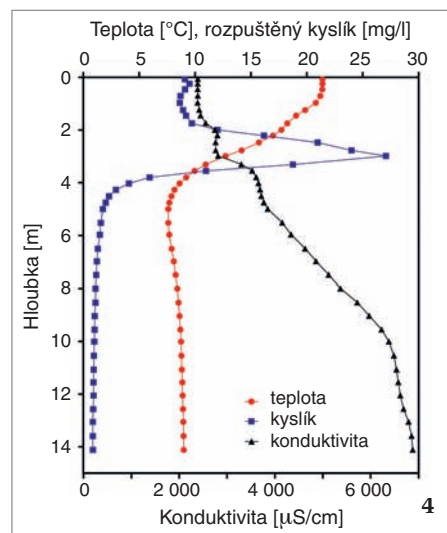
4 Vertikální profil základních fyzikálních parametrů v Hromnickém jezírku v létě – teplota, koncentrace kyslíku a vodivost (konduktivita). Data laskavě poskytl M. Šobr (PřF UK). Orig. L. Nedbalová

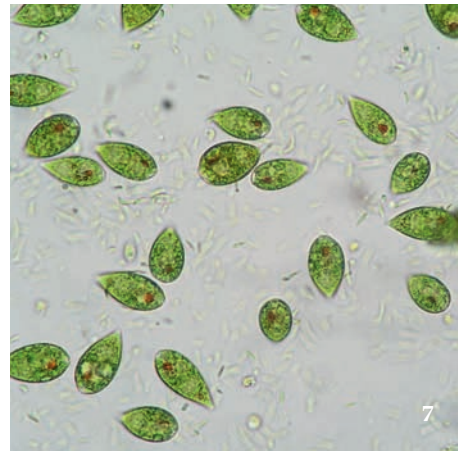
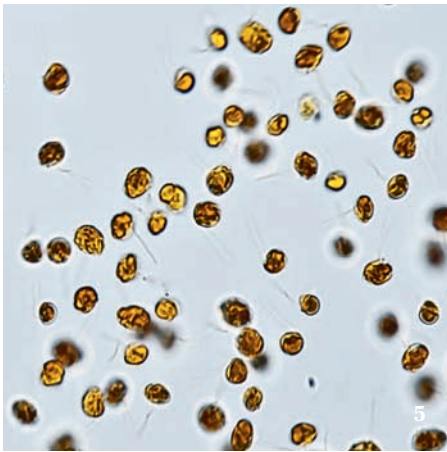
5 až 7 Zástupci fytoplanktonu

Hromnického jezírka: kokální zelená řasa *Coccomyxa elongata* (obr. 6) a bičíkovci *Chromulina* sp. (5) a *Lepocinclis* sp. (7)

8 Planktonní vířník *Cephalodella acidophila* je vázán na velmi kyselé vody. Foto J. Fott (obr. 5–8)

pod hladinou Hromnického jezírka poměrně detailní představu. Během celoročního monitorování fyzikálních a chemických parametrů se podařilo prokázat, že jde o trvale meromiktické jezero. To znamená, že na rozdíl od běžných (holomiktických) jezer se jeho vrstvy během roku nikdy úplně nepromíchají, a nedojde tak k vyrovnání teploty v celém vodním sloupci (blíže v Živě 2022, 2: XLV–XLVII). V limnologické terminologii používáme v souvislosti s tímto typem jezer termíny mixolimnion (vrstva, která se míchá) a monimolimnion (spodní stabilní vrstva, kde dochází k vyčerpání kyslíku). Tyto vrstvy odděluje chemoklina, kterou charakterizuje vzestup vodivosti a teploty vody (obr. 4), nárůst teploty ve spodní stabilní vrstvě je dán teplotou zdejší podzemní vody (8–10 °C, Pitter 2009 v Hrdinka a Šobr 2010). V případě Hromnického jezírka je hlavním důvodem vzniku tohoto jevu extrémní chemismus vody – spodní vrstvy vodního sloupce mají vzhledem k obrovskému množství rozpuštěných látek (zejména síranových iontů a kovů) mnohem větší hustotu než vrstvy povrchové. To označujeme jako chemicky podmíněnou meromixii. Vznik meromixie dále podporuje tvar jámy po těžbě, pro který jsou typické příkré svahy, a fakt, že se hladina nachází několik desítek metrů pod úrovní okolního terénu, což omezuje působení větru. Všechny tyto předpoklady bývají u antropogenních jezer ve zbytkových jámách po těžbě často splněny, a proto je alespoň v našich zeměpisných šířkách mezi nimi výskyt meromixie podstatně častější než u přirozeně vzniklých jezer. I tak ale představuje poměrně neobvyklý jev. V České republice byla permanentní nebo částečná meromixie zjištěna v několika dalších zatope-





ných lomech – např. v Zeleném jezeře, které se nachází nedaleko Hromnického jezírka a vzniklo také po těžbě pyritických břidlic. Meromixie nemusí být nutně vázaná na extrémní chemismus podloží, může být podmíněná hlavně morfologicky. To se ukázalo třeba v případech zatopených žulových lomů Srní u Hlinska nebo Škálí u Blatné, které se vyznačují velkou relativní hloubkou, avšak jejich voda má ve srovnání s Hromnickým jezírkem velmi nízkou vodivost.

Monimolimnion zabírá v Hromnickém jezírku většinu vodního sloupce, a tak není divu, že existence meromixie zásadním způsobem ovlivňuje celý ekosystém.

A přeče to tu žije!

Předchozí řádky snad v dostatečné míře naznačily, jak extrémní jsou podmínky pro organismy v Hromnickém jezírku. Ostatně i oficiální informační tabule umístěná u bývalého lomu varuje, že „voda je mimo řasy zcela bez života“. Měření některých abiotických parametrů však jasně naznačovala, že ve svrchních vrstvách probíhá intenzivní biologická aktivita. Konkrétně šlo o koncentraci rozpuštěného kyslíku, která se v jarním a letním období často blížila až k hodnotě 30 mg/l, což odpovídá přesycení výrazně přes 200 %. Takové množství kyslíku jasně indikuje intenzivní fotosyntézu. Současně zde v průběhu roku docházelo k velkému kolísání koncentrace kyslíku, zatímco spodní vrstvy jezera (monimolimnion) zůstávaly stabilně anoxické.

Pohled pod mikroskopem odhalil původce kyslíkových maxim. Během celoročního sledování se v období časného jara ještě pod ledem vyskytovala ve velkém množství zlativka z rodu *Chromulina*

(obr. 5), zatímco v letním období to byla zelená kokální řasa z rodu *Coccomyxa* (obr. 6). Ta je mimochodem schopna růst i v zásobních roztocích anorganických solí využívaných pro výrobu kultivačních médií. V jiných letech se při příležitostných odběrech vyskytovaly v jezírku i další druhy řas, jako je třeba krásnoočka z rodu *Lepocinclis* (obr. 7) nebo zelený bičíkovec z rodu *Chlamydomonas*.

Ve srovnání s běžnými nádržemi bylo velmi nápadné, že vzorky většinou vypadaly téměř jako čistá laboratorní kultura dané řasy. Tento jev platí pro extrémní prostředí obecně – typický je výskyt pouze malého množství druhů, které však mohou dosáhnout velmi vysokých hustot. Připomeňme si např. fenomén barevného sněhu, který většinou vytvářejí specializované zelené řasy a v němž lze poměrně vzácně najít více než dva druhy. Pro srovnání – ve vzorku fytoplanktonu odebraného z jihočeského eutrofního rybníka můžeme celkem snadno pozorovat desítky druhů sinic a řas.

Z výše uvedeného výčtu řas pozorovaných v Hromnickém jezírku je zřejmé, že druhy úspěšné v tomto extrémním prostředí najdeme napříč taxonomickými skupinami. Porovnání s jinými podobnými lokalitami je možné zejména pro oblast východoněmecké Lužice, kde probíhá intenzivní výzkum jezer vzniklých zatopením hnědohelných dolů. Ve 14 extrémně kyselých jezerech (pH < 3) zde bylo během několikaletého sledování zaznamenáno celkem 13 rodů řas. Převažovali bičíkovci a kromě zelené řasy *Coccomyxa* se zde vyskytovaly všechny rody známé rovněž z Hromnického jezírka. Zajímavé je, že v seznamu nenajdeme žádné sinice, jinak velice úspěšnou skupinu v podstatě ve všech

typech prostředí včetně velmi extrémních. Při takto nízkém pH však chybějí.

Zajímavé je také srovnání s kyselými sopečnými jezerami, která mohou mít chemické parametry podobné jako jezera vzniklá zatopením bývalých lomů. To potvrzuje i fakt, že z hlediska druhového složení fytoplanktonu je nelze na základě dostupných dat nějak jednoznačně odlišit. Musíme však mít na paměti, že bylo prozkoumáno jen malé množství těchto jezer. Navíc jde většinou o studie využívající určování založené na morfologických vlastnostech, které např. v případě malých druhů zelených řas nebo zlativek může být velmi problematické. Mezi tyto lokality patří mimo jiné jezero Caviahué v Patagonii (pH 2,6) nebo japonské jezero Katanuma (pH 1,7). Druhé stálo při úplném začátku studia flóry sopečných jezer. Japonský algolog Keničiro Negoro zde pozoroval masivní výskyt zeleného bičíkovce, kterého v r. 1944 popsal jako nový druh *Chlamydomonas acidophila*.

Další analýzy vody z Hromnického jezírka odhalily příčinu překvapivě vysoké produktivity. Je zde totiž dobře dostupný fosfor, který většinou limituje růst primárních producentů ve sladkých vodách. V hlubších vrstvách u dna byly hodnoty rekordní (více než 1 mg/l PO₄³⁻). Růst fytoplanktonu se však v jezírku omezuje na svrchní vrstvy s dostupným světlem. Voda má kvůli zabarvení poměrně nízkou průhlednost. Otázkou je původ fosforu v situaci, kdy významným zdrojem nemůže být komunální znečištění ani geologické podloží. Pravděpodobně jde o splach z okolních polí kombinovaný s rozkladem organické hmoty, která se postupně v jezere hromadí. Ukazuje se tedy, že produkce v extrémně kyselých jezerech může být relativně vysoká, pokud není limitována nedostatkem živin. To platí i v případě některých lokalit ve Španělsku (např. Cueva de la Mora) nebo v Německu (Lugteich), které mají podobné vlastnosti jako Hromnické jezírko. Velmi nízké pH samo o sobě zjevně nevylučuje eutrofní podmínky.

Otázkou je, zda v takto extrémním prostředí mohou fungovat konzumenti, kteří by byli schopni poměrně velkou biomasu řas využít. Výzkumem atmosféricky acidifikovaných jezer bylo zjištěno, že planktonní korýši, neefektivnější „spásáči“ fytoplanktonu, často kvůli toxickému působení hliníku úplně mizí, už když pH klesne pod hodnotu 5 (Fott a kol. 1994). První pokusy nalovit zooplankton v Hromnickém jezírku

skutečně skončily neúspěchem. Pomocí planktonní sítě s menšími oky (25 µm) se však posléze podařilo objevit drobného vířníka z rodu *Cephalodella* (obr. 8).

Sladkovodní vířníci se vyskytují doslova všude, a to včetně velmi extrémních prostředí, jako jsou třeba trvale zamrzlá antarktická jezera. Detailnější pozorování jedinců z jezírka odhalilo, že patří k nedávno (2011) popsanému druhu *C. acidophila*, který nacházíme také v již zmíněných lužických jezerech. Jak jeho druhový název napovídá, jde o specialistu na silně kyselé prostředí, kde jiné druhy zooplanktonu nemohou přežít. Záhadou zatím zůstává, odkud se do těchto relativně velice mladých lokalit rozšířil. Jeho efektivita konzumace fytoplanktonu je však v porovnání s koryšmi značně omezená a v jezírku se navíc vyskytuje v nízkých hustotách. To je důvod, proč zde můžeme ve svrchních vrstvách, kde je dostupné světlo, pozorovat tak velkou biomasu drobných řas, které jsou jinak pro zooplankton lákavou potravou – přítomní konzumenti je nevládají významnějším způsobem omezit. Tento jev se dá zobecnit i napříč jinými typy extrémních prostředí, připomeňme si opět třeba barevné sněhy nebo mohutné nárosty sinic a jiných mikroorganismů v horkých pramenech.

Pokračující průzkum Hromnického jezírka pak odhalil ještě další zajímavé organismy u břehů – makroskopické shluky zelených vláken, která se ukázala být protonemata (prvoklíčky) mechu z rodu *Dicranella* (viz obr. 9–11), výrazně červeně zbarvené larvy pakomára kouřového (ze skupiny *Chironomus plumosus*) a v řasových nárostech dalšího vířníka *Elosa worralii*, obývajícího jinak též rašeliniště.

Život ve zředěné kyselině sírové

Z fyziologického hlediska je život v silně kyselém prostředí výzvou. Organismy zde žijící si vyvinuly celou řadu ekofyziologických adaptací a životních strategií, které jim umožňují toto prostředí obývat. Jde především o ultrastrukturální změny v membránách buněk, produkci speciálních látek a enzymů a s tím spojené metabolické procesy. To se týká zejména acidofilních mikroorganismů, které jsou specializované na velmi nízké hodnoty pH (většinou se uvádí méně než 3) a v cirkumneutrálních podmínkách nepřežijí. Většinou to jsou bakterie a archea, jedním z rodů je např. chemoautotrofní *Thiobacillus*, jehož zástupci získávají energii oxidací síry nebo železa. Bude jistě zajímavé věnovat pozornost také prokaryotním organismům Hromnického jezírka, kde dosud nebyly studovány. Mezi acidofilní řasy patří třeba krásnoočka *Euglena mutabilis*, které představuje dominantu v nárostech známé řeky Rio Tinto ve španělské Andalusii, ovlivněné těžbou sulfidových rud. V prostředí neovlivněném člověkem byl výskyt tohoto druhu popsán na lokalitě Smoking Hills v Kanadě. Lignitové podloží bohaté na síru způsobuje časté samovznícování a oxidy síry vznikající hořením podloží způsobily okyselení tamních jezer až na pH 1,8. Zajímavou skupinou acidofilních řas jsou jednobuněčné ruduchy z třídy Cyanidiophyceae, které kromě nízkého pH vyžadují teplotu kolem 40 °C,



9 až 11 Protonemata (prvoklíčky) mechu z rodu *Dicranella* tvoří nápadné chuchvalce zelených vláken v litorálu jezírka (obr. 9 a 10). Pohled na protonemata pod mikroskopem – charakteristickým znakem odlišujícím je od vláken zelených řas je šikmá buněčná přepážka (11). Foto P. J. Juračka (obr. 9, 10) a J. Fott (11)

což je řadí mezi polyextremofily. Rostou ve vulkanicky aktivních oblastech po celém světě. Nedávno jsme na Ostravsku objevili antropogenní lokalitu těchto termoacidofilních řas – hořící haldu po těžbě uhlí v Heřmanicích. Jelikož se její starší pohybuje pouze v řádu desetiletí, je jasné, že šíření těchto organismů musí být poměrně efektivní, i když netvoří žádná specializovaná odolná stadia. Jejich nejbližší místo výskytu je okolí sopky Larderello v Toskánsku. Nejen v kontextu českého algologického výzkumu je zajímavá zelená řasa *Dunaliella acidophila*, popsaná Tomášem Kalinou (původně jako *Spermatozopsis acidophila*) z přírodní rezervace Soos v západních Čechách a později pozorovaná v solfatárech v okolí Neapole. Druh roste optimálně při pH 1, což je dosud nejnižší hodnota zaznamenaná pro řasy. V planktonu kyselých jezer často najdeme zelené bičíkovce označované jako *Chlamydomonas acidophila*. Dnes je už jasné, že se pod tímto názvem skrývá více druhů, přičemž ten z Hromnického jezírka je jiný než již zmíněná řasa z japonského jezera

Katanuma. Jde pravděpodobně spíše o acidotolerantní, a ne o striktně acidofilní organismus, což znamená, že dokáže žít v širokém rozmezí pH včetně neutrálních hodnot. Tento metabolický typ se mimochodem vyskytuje mnohem hojněji než úzce specializované acidofilní organismy.

Hlavními problémy, se kterými se acidofilní organismy musejí vypořádat, je vysoká koncentrace H^+ iontů (protonů) a s nízkým pH spojené vysoké koncentrace kovů. Buňky řas žijících ve velmi kyselém prostředí si udržují pH cytosolu blízko neutrálnímu, což je nezbytné ke správnému fungování buněčných procesů. K tomu využívají nejrůznější mechanismy jako např. snížení propustnosti membrán pro protony, schopnost zbavovat se efektivně přebytečných protonů pomocí velkého množství membránových přenašečů (protonové pumpy H^+ -ATPázy) a pufrací kapacitu cytosolu. Neobvyklou odpovědí na neobvyklé prostředí, která pomáhá vyrovnat se s extrémním protonovým gradientem, je obrácený (kladný) elektrický potenciál buněk. To vše samozřejmě vyžaduje velké množství energie.

Pro toxicky acidofilů je také klíčové zamezit toxickému působení kovů ve svém vnitřním prostředí. Podobně jako v případě protonů je jedním z mechanismů zabránění průniku kovových iontů do buňky, což může být zajištěno ochrannou vrstvou extracelulárních polymerických látek (známo u biofilmů) a snížením propustnosti membrány pro tyto ionty. V případě nežádoucího zvýšení koncentrace kovových iontů uvnitř buňky následuje jejich cílený transport a tvorba komplexů, což zabrání účasti těchto iontů při metabolických procesech. To je zajištěno např. produkcí peptidů metalothioneinů třídy III, indukovanou zvýšenou koncentrací kovů.

Výzkum fyziologických adaptací acidofilních a acidotolerantních organismů není zdaleka u konce. Dosavadní studie byly provedené na malém množství druhů, a není tedy jasné, do jaké míry můžeme zjištěné mechanismy generalizovat a jak se proměňují v gradientu pH. Dosud např. přesně nevíme, jaké jsou strukturální vlastnosti membrán acidofilních řas nebo jak fungují enzymy na povrchu membrán vystavených nízkému pH. Detailní pochopení adaptací umožňujících život v extrémně kyselém prostředí je též potřebné pro případné efektivní biotechnologické využití zdejších mikroorganismů.

Co napsat závěrem? Díky těžbě pyritických břidlic vznikl na Plzeňsku podivuhodný vodní ekosystém, který se trochu podobá extrémně kyselým sopečným jezerům, ale současně se vyznačuje řadou specifických rysů daných geologickým podložím a tvarem jámy lomu. Hromnické jezírko je v rámci České republiky unikátní lokalitou, která by si zasloužila ochranu nejen jako významná přírodní památka a připomínka naší průmyslové historie.

Výzkum podpořilo Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy.

Seznam použité literatury uvádíme na webové stránce Živy. K dalšímu čtení např. Živa 2009, 2 a 4; 2013, 5: 224–229; 2021, 6: 290–295.