

Bioluminiscence hub – odvěký a stále záhadný fenomén

Bioluminiscence, tedy schopnost organismů vyzařovat viditelné světlo, se v evoluci života na Zemi vyvinula mnohokrát nezávisle u nejrůznějších skupin organismů od bakterií, přes mikroskopické řasy, řadu skupin bezobratlých živočichů, až po obratlovce, a to jak v suchozemských, tak hlavně v mořských ekosystémech. Jednou z neznámějších skupin světélkujících organismů jsou vedle hmyzu (Živa 2009, 5: 226–227) také makroskopické houby (makromycety), jejichž bioluminiscence byla zaznamenána již ve starověkém Řecku či Římě např. Aristotelem nebo Pliniem starším, a pozorována pravděpodobně ještě mnohem dříve. Tento jev se tak v některých oblastech světa dostal do obecného povědomí jako falešný oheň (anglicky foxfire) nebo svítící dřevo, a dost pravděpodobně dal vzniknout mýtům a tajemným pohádkovým postavám. Svítit totiž mohou nejen plodnice, ale také podhoubí (mycelium) porůstající substrát – zpravidla tlející dřevo nebo listí, které pak mohou vytvářet impozantní kulisu temného nočního lesa, zvláště třeba ve vlhkých tropech, kde celkovou atmosféru dále umocňují hlasité projevy jiných organismů. Do značné míry zůstává bioluminiscence hub tajemstvím i pro moderní vědu, která se vždy zaměřovala spíše na živočichy a houbám věnuje větší pozornost až v posledních letech.

V současnosti známe 81 taxonů hub, v nichž byla bioluminiscence víceméně spolehlivě doložena; všechny patří do oddělení stopkovýtrusných (*Basidiomycota*) a ve všech případech jde o hniložijné (saprotrofní) houby s bílým výtrusným prachem. Ze zmíněných 81 taxonů bylo 14 nově popsáno a u tří byla bioluminiscence zjištěna teprve v posledních pěti le-

tech. Je tedy téměř jisté, že seznam se bude dále rychle rozšiřovat, zejména o tropické zástupce. Všechny nově popsané taxony totiž pocházejí z tropů – nejvíce z Malajsie (9), další z Brazílie, Portorika, Indie a Tchaj-wanu. Podrobný přehled taxonů makroskopických hub se světélkujícím myceliem a/nebo plodnicemi najdete v tab. na webové stránce Živy.

Na základě fylogenetických analýz byly odlišeny čtyři linie, v nichž se bioluminiscence vyvinula. Zdaleka nejpočetnější je linie mycenoidní, zahrnující druhy rodu helmovka (*Mycena*, obr. 2 a 3), *Roridomyces* (česky rovněž helmovka), *Filoboletus* (obr. 4 a 5), *Poromycena*, *Favolaschia* a pařezník (*Panellus*). Do druhé linie – *Omphalotus*, patří rody hlívovník (*Omphalotus*) a *Neonothopanus*. Třetí linii tvoří rod václavka (*Armillaria*), pro niž je typická bioluminiscence mycelia; zatím byla potvrzena u pěti druhů, předpokládá se však, že se vyskytuje u většiny, ne-li u všech zástupců tohoto rodu. Do čtvrté linie – *Lucentipes*, se zatím řadí pouze dva druhy, a sice *Gerronema viridilucens* a *Mycena lucentipes* (Desjardin a kol. 2008). Kromě těchto linií stopkovýtrusných hub se v literatuře objevují zmínky o bioluminiscenci u dalších hub, např. u vřeckovýtrusného rodu dřevnatka (*Xylaria*, *Ascomycota*). Tyto informace jsou však jen velmi kusé.

Ačkoli přinejmenším na základě nesystematického pozorování se luminiscenční houby vyskytují zejména v tropických deštných lesích, několik druhů lze nalézt i v temperátních oblastech. Jde nejčastěji o zástupce, kterým světélkuje mycelium, nikoli plodnice (různé druhy rodu *Armillaria* a *Mycena/Roridomyces*). Na území České republiky pak nacházíme jediný druh schopný bioluminiscence plodnic pozorovatelné pouhým okem, a to hlívovník olivový žlutooranžový (*Omphalotus olearius* var. *illudens*, obr. 6). Tato jedovatá lupenatá houba u nás roste v nejteplejších oblastech; její světélkování bývá jen velmi slabé. Luminiscence plodnic se uvádí také u helmovky krvonohé (*M. haematopus*) – u ní však byla zjištěna pouze citlivými fotometrickými přístroji (podobně jako u mnohých dalších druhů, které se ale obecně za světélkující nepovažují). Zvláštním případem je pařezník obecný (*P. stipiticus*, obr. 7), u něhož světélkují plodnice rostoucí v Severní Americe, zatímco evrop-





1 Tropický deštný les – ideální místo, kde hledat světélkující houby. Wehea Forest na Východním Kalimantanu

2 a 3 Helmovka *Mycena chlorophos* nalezená na Východním Kalimantanu v krasové oblasti Sangkulirang-Mangkalihat. Plodnice vyzařovaly intenzivní zelené světlo po celou noc i během dne. Borneo, Indonésie

4 a 5 Druh *Filoboletus manipularis* z oblasti Sangkulirang-Mangkalihat světélkoval poměrně slabě, avšak viditelně.

Chemická podstata jevu dosud nebyla objasněna

Ani po desítkách let studia neexistuje shoda v názorech na molekulární ani buněčnou organizaci mechanismu bioluminiscence hub. V současnosti jsou uznávány dva koncepty: první předpokládá existenci substrátu (obecně nazývaného „luciferin“, nemusí však být totožný s luciferinem jiných bioluminiscenčních systémů), který je oxidován za přítomnosti enzymů (luciferáz); podle druhého konceptu představuje luminescence hub taktéž výsledek oxidace organického substrátu, ale bez přítomnosti specializovaného enzymu. V obou modelech jako ústřední molekuly figurují substrát neznámé struktury („luciferin“ nebo např. nambin), který je oxidován za současné emise světla, a zřejmě ne jeden, ale hned několik enzymů. Podle prvního modelu dochází v prvním (temnostním) kroku k redukci luciferinu NAD(P)H-dependentní reduktázou a v druhém (světelném) kroku k oxidaci kyslíkem pomocí luciferázy (Stevani a kol. 2013). Podle druhého

modelu substrát oxidují reaktivní formy kyslíku za přítomnosti jednoho či více enzymů jiných metabolických drah. Celý proces je pak podle autorů modelu úzce spjat s ligninolytickým enzymatickým komplexem, cytochromem P450 a enzymy dýchacího řetězce (Bondar a kol. 2012). Luminescenční komplex byl úspěšně izolován a molekulární charakterizaci jednotlivých komponent tak lze očekávat v ne příliš vzdálené budoucnosti. Již teď je ale zřejmé, že celý mechanismus bioluminiscence hub se od systémů jiných světélkujících organismů liší a zároveň zůstává společný pro různé vývojové linie hub (nebo alespoň u stopkovýtrosných). Jednotlivé komponenty (reprezentované studeným a horkým extraktem – enzymem a substrátem) jsou totiž vzájemně kompatibilní mezi nepříbuznými světélkujícími taxony. Navíc různé houby vyzařují vždy světlo zelené, s maximální intenzitou v oblasti vlnových délek 520–530 nm, což ukazuje na zapojení podobného emitujícího substrátu.

Evoluce bioluminiscence je hnána různými selekčními tlaky

Jelikož při luminescenci dochází ke spotřebovávání energie organismu, je dost pravděpodobně uzpůsobena nějaké ekologické funkci. Podle jedné z hypotéz má emitované světlo přitahovat hmyz, který následně zprostředkovává šíření výtrusů. Tato hypotéza vysvětluje častý výskyt svítících hub v prostředí hustých tropických lesů, kde se větrem mohou spory šířit pouze omezeně. Podporuje ji také fakt, že nejintenzivněji obvykle svítí lupeny, potažmo výtrusy (Desjardín a kol. 2008), u některých druhů zejména v době zralosti. Skutečně bylo různými experimenty prokázáno (a dá

se pozorovat také *in natura*), že svítící plodnice nebo mycelium jsou pro hmyz atraktivnější než ty nesyvící (Sivinski 1981). Hypotéza však nevysvětluje luminescenci podhoubí, které spory neprodukuje.

Další pravděpodobná teorie se zakládá na odpuzování fotofobních či negativně fototropních fungivorů (organismů živících se houbami), patogenů a konkurentů. Část mycelia totiž roste skryta hluboko v substrátu, tedy v prostředí, kam světlo za normálních okolností neproniká. Podobně může luminescence sloužit jako varovný signál upozorňující na toxicitu nebo nepoživatelnost, tedy vlastnosti, které opravdu byly u mnoha světélkujících hub prokázány. Z dalších stojí za pozornost hypotéza o přitahování predátorů. Pokud počet predátorů efektivně přesáhne počet fungivorů, získá houba ochranu, a tím i selekční výhodu (Sivinski 1981). Tato úvaha se podobá teorii „poplašného systému“ vysvětlující světélkování obrněnek (*Dinoflagellata*) a podporuje ji experimentální zjištění, že narušení mycelia vede k intenzivnější luminescenci u některých václavek. Poněkud paradoxní se může zdát hypotéza o lákání fungivorů – předpokládá, že pokud je mycelium světélkujícího druhu nepoživatelné nebo těžko stravitelné, zkonsumuje přilákaný fungivor přednostně jiné houby, a světélkující druh tak získá výhodu. Houba může využít přilákaný hmyz i jako zdroj živin pocházejících z jeho exkrementů. Množství těchto živin však musí vyrovnat energetickou zátěž, kterou světélkování představuje. Nutno podotknout, že žádná z těchto myšlenek zatím nebyla exaktně testována.

Objevují se však i názory, že bioluminiscence žádný ekologický význam nemá a je pouze vedlejším produktem některých



metabolických procesů, kdy se světlo uvolňuje namísto tepelné energie během enzymatických oxidací. V případě bakterií se zdá, že produkce světla nebyla prvotním účelem bioluminiscence, ale mohlo jít o mechanismus chránící před škodlivým kyslíkem v době, kdy se začal hromadit v atmosféře, tedy asi před 2,3 miliardami let. Navíc emitované světlo stimuluje systémy opravující DNA v bakteriální buňce, což může být jeden z mechanismů evoluce bioluminiscence nejen u bakterií. Bioluminiscence by tak houbám mohla zajišťovat ochranu buněk před peroxidy uvolňovanými při štěpení ligninu. Dosud všechny známé luminiscenční houby způsobují bílou hnilobu dřeva (Živa 2013, 2: 54–57), jsou tedy schopny rozkládat lignin. Hypotézu podporuje fakt, že určitou úroveň luminiscence vykazuje většina, ne-li všechny druhy hub. Obvykle ale není vyzařované světlo dost intenzivní pro zachycení lidským okem. Světélkování by tak mohl být metabolický proces společný všem makromycetům. Musíme však zdůraznit, že bioluminiscence by neměla být zaměňována s chemiluminiscencí, tedy procesem spojeným s oxidačním stresem a produkcí reaktivních kyslíkových a karbonylových forem.

Proti fyziologické hypotéze o významu bioluminiscence mohou hovořit zjištění jako diurnální fluktuační (některé druhy ve dne luminiscenci utlumují) nebo reakce na vnější ozáření (utlumení nebo zesílení luminiscence u parazitických, resp. saprotrofních druhů), indukující spíše ekologický než fyziologický význam. Je také možné, že původně neužitečný vedlejší produkt chemických reakcí (případně produkt s fyziologickým účinkem) nabyl ekologické adaptivní funkce. Na evoluci bioluminiscence se rovněž mohly podílet kombinace různých selekčních tlaků specifické pro každou jednotlivou skupinu hub, a celý fenomén by tak byl mnohem komplikovanější, než se nám dříve mohl zdát.

Svítilící houby našly uplatnění i v lidské společnosti

Domorodci v Mikronésii si jimi zdobili hlavy při rituálních tancích nebo si rozdrčenými plodnicemi potírali obličej, aby vyděsili nepřítele. Zároveň tyto houby považovali za zlou předzvěst, a proto je raději preventivně ničili. Holandský lékař a konzul v Indonésii George Everhard Rumph (1637–1706) popsal, jak původní obyvatelé

lé využívali světélkující houby k osvětlování cesty v noci. V moderní éře se hledá i jejich technologické uplatnění. Luminiscenční druhy již byly použity pro vývoj testů toxicity některých látek, např. fenolických sloučenin nebo těžkých kovů, a po rozluštění struktury jednotlivých komponent bioluminiscenční reakce se dají očekávat další aplikace v biotechnologiích.

Výzkum probíhá za podpory projektem Udržitelný rozvoj výzkumu v Centru regionu Haná (LO1204).

Citovaná literatura uvedena na webu Živa.

6 Hlívovník olivový žlutooranžový (*Omphalotus olearius* var. *illudens*) – jediný český zástupce hub se světélkujícími plodnicemi. Roste vzácně v teplých územích České republiky zejména na dřevě dubů a kaštanovníků.

7 Pařezník obecný (*Panellus stipticus*) – u plodnic rostoucích v Severní Americe je známa bioluminiscence, u evropských nikoli.

8 Primární deštný les na vápenci v krasové oblasti Sangkulirang-Mangkalihat. Východní Kalimantan, Borneo. Snímky M. Sochora a Z. Egertové

