Univerzita Karlova
Pedagogická fakulta
Katedra biologie a environmentálních studií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Světélkování organismů jako didaktické téma

Bioluminiscent organisms as didactic theme

Michaela Ševicová

Vedoucí práce:	prof. RNDr. Lubomír Hanel, CSc.
Studijní program:	Specializace v pedagogice (B7507)
Studijní obor:	Biologie, geologie a environmentalistika se zaměřením na vzdělávání — Chemie se zaměřením na vzdělávání

r. 2022

Odevzdáním této bakalářské práce na téma Světélkování organismů jako didaktické téma potvrzuji, že jsem ji vypracovala pod vedením vedoucího práce samostatně za použití v práci uvedených pramenů a literatury. Dále potvrzuji, že tato práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

Praha, 13.04.2022

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu bakalářské práce prof. RNDr. Lubomíru Hanelovi, CSc., za všechny jeho cenné rady, poskytnuté materiály, ochotu, vstřícný přístup a čas, který mi věnoval.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá světélkováním (bioluminiscencí) u živých organismů a zkoumá, do jaké míry je toto téma prezentováno a vysvětlováno ve vybraných školních učebnicích. V teoretické části práce jsou uvedeny obecné poznatky o světélkování organismů, jakým způsobem bylo v dávné historii vysvětlováno a postupně zkoumáno, jaký je význam bioluminiscence a jaké jsou i možnosti jejího využití v současnosti. Shrnuty jsou informace o způsobech a důvodech světélkování u vybraných (modelových) skupin bioluminiscenčních organismů (bakterie, houby, řasy, bezobratlí, obratlovci). V didakticky zaměřené části práce je provedena analýza vybraných, často používaných učebnic přírodopisu pro 2. stupeň základních škol a nižších ročníků víceletých gymnázií. Dále práce obsahuje dotazníkové šetření zaměřené na znalosti žáků těchto ročníků o světélkování organismů. Připraven byl také pracovní list s videem, obsahující procvičující otázky.

KLÍČOVÁ SLOVA

bioluminiscence, světélkování, luciferin, luciferáza, bioluminiscenční organismy

ABSTRACT

The primary research question of this thesis is bioluminescence of living beings and the extent to which it is represented and explained in a selection of middle school textbooks. The theoretical part of the thesis establishes general facts about bioluminescence itself, methods for teaching and gradual study of this topic in the distant past, as well as the importance of bioluminescence and its potential for use in today's world. In addition, this part includes a summary of the various means and motives of bioluminescence in select (model) groups of organisms (bacteria, fungi, algae, invertebrate, vertebrate). The didactically oriented part of the thesis involves an analysis of select textbooks that are frequently used Czech middle and grammar schools. The thesis also includes questionary-based research, involving the students in the examined school years and aimed at assessing their knowledge about bioluminescence in living organisms. A video and a worksheet with practice questions was also prepared as part of the research.

KEYWORDS

bioluminescence, luminescence, luciferin, luciferase, bioluminescent organisms

Obsah

Úvod ... 7

1 Luminiscence ... 8

2 Bioluminiscence ... 10

2.1 Historie zkoumání bioluminiscence ... 10

2.2 Biologická podstata bioluminiscence ... 11

2.3 Chemická podstata bioluminiscence ... 12

2.4 K čemu bioluminiscence organismům slouží ... 13

2.5 Využití bioluminiscence ve vědě ... 15

3 Bioluminiscence u bakterií ... 16

3.1 Obecná charakteristika ... 16

3.2 Chemismus ... 16

3.3 Zástupci ... 17

4 Bioluminiscence u obrněnek ... 18

4.1 Obecná charakteristika ... 18

4.2 Chemismus a funkce ... 18

4.3 Zástupci ... 19

5 Bioluminiscence u hub ... 21

5.1 Obecná charakteristika ... 21

5.2 Chemismus a funkce ... 21

5.3 Zástupci ... 22

6 Bioluminiscence u bezobratlých ... 23

6.1 Žahavci a žebernatky ... 23

6.2 Kroužkovci ... 24

6.3 Měkkýši ... 25

6.4 Členovci ... 25

7 Bioluminiscence u obratlovců ... 30

7.1 Obecná charakteristika 30
7.2 Chemismus a funkce 30
7.3 Zástupci 32
8 Bioluminiscence jako téma v učebnicích přírodopisu na ZŠ a nižších stupních gymnázia 34
8.1 Učebnice pro 6. ročník ZŠ a primu víceletých gymnázií 34
8.2 Učebnice pro 7. ročník ZŠ a sekundu víceletých gymnázií 36
9 Pracovní list s dotazníkem 37
Závěr 44
Seznam použitých informačních zdrojů 45

Úvod

Každý si jistě rád vzpomene na pohádkový večerníček Broučci od známého českého spisovatele Jana Karafiáta. Broučci neboli také svatojánské mušky, jak je autor nazýval, měli v pohádce důležitou roli, a to svítit svými lucerničkami lidem na cestách (Dvořáčková, 2008, s. 36). Mnohé z dětí se v této chvíli poprvé setkávají se bioluminiscencí, která je pro tyto brouky naprosto typická. Každý pak pozná světlušku, ale už málokdo ví, k čemu jim toto světélkování vlastně slouží a jak vzniká. Některé pak i překvapí, že to nejsou pouze světlušky, které používají emitovaní světla ve svém životě.

Dnes je již známo veliké množství všech různých organismů, které světélkování ve svém životě využívají. Každému, kdo do tajů bioluminiscence pronikne, jistě začne v hlavě vrtat pár otázek, např. jak je možné, že se tento světelný proces vyvinul jak u těch nejmenších prokaryotických bakterií, tak i u velikých děsivých a tajemných hlubokomořských ryb nebo proč se světélkování vyvinulo jen u některých druhů a ne rovnou třeba u celého živočišného kmene? Stejně jako je škála zástupců široká, jsou i důvody produkce tohoto záření rozdílné. Sama historie zkoumání a vnímání bioluminiscenčního jevu je zajímavá a provází lidstvo už odpradávna. Jakým způsobem organismy světlo vytvářejí, jaké látky a struktury k tomu potřebují či jak by se toho dalo popřípadě nějak využít je předmětem mnoha výzkumů.

V této práci jsem se dále zabývala tím, zda se v učebnicích přírodopisu pro šestou a sedmou třídu základních škol a odpovídajících ročníků víceletých gymnázií zmiňují o světélkování organismů a vysvětlují jej. Vytvořila jsem přehled doporučovaných učebnic, z nich vybrala všechny zmínky a podrobila je analýze. Na vybrané základní školy a víceletá gymnázia jsem také zaslala připravený krátký dotazník týkající se povědomosti o bioluminiscenci. K práci byl zaslán i pracovní list, kde jsem využila zpracovaného videa a vytvořila otevřené i uzavřené úlohy k tomuto tématu.

1 Luminiscence

Luminiscenční jevy provází lidstvo už od počátku jeho vzniku. V mnoha rozličných kulturách po celém světě se vyprávějí báje a pověsti, kde se zjevují světélkující magické bytosti a září tajemné očarované předměty. Naši předci si těchto úkazů všímali, fascinovali je a připisovali je něčemu nadpřirozenému. Dnes už se naše znalosti o luminiscenci prohloubily, ale kdo ví, zda už jsme přišli všem těmto záhadám na kloub (Pokorný, 2015, s. 10). Základ slova luminiscence tvoří *lumen*, což se z latiny překládá jako světlo. Zjednodušeně se dá říct, že se jedná se o proces, při kterém látky vyzařují energii, kterou už nepotřebují, a ta se nám poté jeví jako luminiscenční záření. Toto záření se pak stává buďto pro člověka normálně viditelné, nebo je vyzařováno ve spektrech, která nejsou pro lidské oko postřehnutelná. Jedná se hlavně o ultrafialové a infračervené záření (Hejduková, 2014, s. 19–20).

Z odborných zdrojů si spíše přečteme, že se jedná o *„nerovnovážné záření, vysílané tělesem navíc oproti rovnovážnému záření popsanému Planckovým zákonem.“* Rovnovážné záření je zde míněno jako takové záření, kdy zahřeje-li se těleso na určitou teplotu, začne vysílat do svého prostředí energii a část této energie se zase vrací z okolního prostředí zpátky do tělesa. Vše probíhá v rámci zákona jejího zachování. Z této energie, která se podle Planckova zákonu vyzařuje po *kvantech* nebo také jinak *fotonech*, vzniká tzv. *teplé světlo*. Část energie se zde vydá jako světlo i teplo. Tento případ ale u luminiscence nenastává. Těleso, které zde vyvolává tepelné záření, nemusí být vůbec nabité vyšší teplotou. Často je tomu i naopak; čím nižší teplota, tím vyšší intenzita svícení, a proto se toto záření nazývá *teplem studeným* (Pokorný, 2015, s. 10–12). Při luminiscentním svícení nevzniká skoro žádné teplo (Teplý a Míka, 2015, s. 9).

Luminiscenční záření je ale stále potřeba nastartovat nějakou energií. K tomuto procesu se vztahují dva odborné termíny: *buzení* neboli *excitace* (Havlík, 2017, s. 21).

Látka zprostředkovávající luminiscenci se nazývá *luminofor*. Při excitaci dochází k tomu, že elektrony luminoforu po dodání potřebné energie přechází na „*vyšší energetickou hladinu*“. Excitace netrvá ale zpravidla dlouho, a tak se elektrony za krátkou dobu vrací na původní energetickou hladinu, ze které začínaly. Při tomto vracení se uvolňuje dané světlo (Teplý a Míka, 2015, s. 9).

K luminiscenci patří dva zdánlivě podobné termíny a těmi jsou *fluorescence* a *fosforescence*. Rozdíl v těchto pojmech je daný dobou, za kterou, po úplném ukončení excitace, látka ještě

vyzařuje světlo. U fluorescence se jedná o skoro okamžité ukončení svícení, ale u fosforescence může světelné záření trvat až několik hodin (Pokorný, 2015, s. 13).

Zdali má látka luminiscenční schopnosti, bývá často složité rozpoznat. Jen těžko se totiž tato vlastnost dá posoudit podle vnější či vnitřní struktury. Jedinou vlastností, která bývá těmto látkám většinou společná, je, že hůře či vůbec nevedou elektrický proud. Jednat se ale může o jednoduché anorganické prvky a sloučeniny, či také složitější organické látky (Pokorný, 2015, s. 12).

Existuje několik druhů a variant luminiscence, jako je např. chemiluminiscence, fotoluminiscence, elektroluminiscence či bioluminiscence. Rozdíl mezi nimi spočívá hlavně ve způsobu buzení energie (Havlík, 2017, s. 21).

2 Bioluminiscence

Tento zvláštní typ luminiscence se někdy udává jako podtyp chemiluminiscence. Obecně je způsobena biochemickými reakcemi, které probíhají v tělech některých organismů. Jedná se v podstatě o vyzařování (*emisi*) světla, které pak vnímáme jako různě barevné. Důležité je, že bioluminiscenci využívají pouze živé organismy (Pokorný, 2015, s. 15).

2.1 Historie zkoumání bioluminiscence

V dřívějších dobách, kdy si naši předci mohli v noci svítit pouze ohněm nebo se v temnotě orientovali podle záře hvězd a Měsíce, byly např. světlušky nebo záření vycházející z kusu dřeva ležícího u cesty, na kterém rostla světélkující plíseň, něčím, co si neodkázali bez nadpozemských sil vysvětlit. Od té doby vědění lidstva v mnohém pokročilo a člověk tak začal více do hloubky zkoumat taje bioluminiscence.

Už z dob starověké Číny se nám dochovaly lidové písně a básně, které dokazují zájem tehdejších lidí o tento jev. Ve starém Řecku byl filozof Aristoteles (384-322 př. n. l.) jedním z prvních, kdo se o bioluminiscenční organismy více začal zajímat. Všimnul si třeba světélkování masa mrtvých ryb, které bylo způsobené bioluminiscenčními bakteriemi, či lehké záře vycházejícího z moře, kterou měly na svědomí nejspíše některé druhy obrněnek. Ještě podrobněji se tímto začal zabývat Plinius starší (23–79 n. l.), autor *Naturalis Historia*, ve které zaznamenal a popsal mnoho bioluminiscenční organismů, od hub po žahavce, měkkýše, či dokonce světélkujícího ptáka, který je ale nejspíše jen pověstí.

Ve středověku si s rozvojem námořnictví začali lidé více všímat mořské bioluminiscence. I Kryštof Kolumbus (1451–1506) zaznamenal na svých cestách, že se v moři poblíž San Salvadoru vyskytují záhadná světla, která byla nejspíše způsobená přítomností mořského mnohoštětinatce rodu *Odontosyllis*. Profesor přírodních věd Conrad Gestner (1516-1565) byl prvním učencem, který fenoménu luminiscence věnoval odborně celou publikaci. Neunikla ani pozornosti slavného Charlese Darwina. Nebyl však ve své době ještě schopen pochopit princip, na kterém toto záření funguje.

Dánský lékař Bartholin (1616-1680) přináší ve své knize *De Luce Animalium* spoustu nových myšlenek o luminiscenci, které zřejmě inspirovaly další vědce své doby, aby se tomuto tématu začali hlouběji věnovat. Jedním z nich byl i slavný vědec Robert Boyle (1627-1691), který rád prováděl různé experimenty. Zkoumal např. účinky vzduchu na bioluminiscenci a se svým

asistentem přišli na to, jak velmi je důležitá přítomnost kyslíku během reakce. O existenci kyslíku se ještě pár dalších let nevědělo.

Nato začalo na poli vědy docházet k dalším důležitým objevům; bioluminiscence není pro dané organismy životně důležitá reakce nebo že bioluminiscence je vlastně chemiluminiscence probíhající uvnitř daného tvora. S vývojem lepších optických zařízení se pozorování mikroskopických organismů stávalo snazší. Až v 19. století se tak objevila více jak polovina bioluminiscenčních druhů, které dnes známe. Objev Raphaëla Duboise, že se v bioluminiscenci uplatňuje reakce substrátu nazvaného luciferin a enzymu luciferáza, se stal jedním z velkých témat zrovna začínajícího oboru – biochemie (Lee, 2008).

2.2 Biologická podstata bioluminiscence

Bioluminiscence vůbec není v přírodě tak vzácná, jak by se mohlo na první pohled zdát. Ve velkých hloubkách oceánu, kde se s tímto jevem můžeme setkat nejčastěji, bioluminiscenci vykazuje většina zdejších obyvatel (Močubová, 2008, s. 10). Na souši se pak objevuje na nejrůznějších stanovištích (Oba a Schultz, 2014, s. 4).

Světlo emituje spousta druhů bakterií, hub i živočichů, ale u vyšších rostlin a dokonalejších obratlovců, jako jsou třeba savci, se žádný bioluminiscenční druh ještě nezaznamenal. Její výskyt mezi druhy bývá čistě nahodilý. Organismy, u kterých se bioluminiscence vyskytuje, nevykazují žádný společný systematický znak, který by je spojoval (Pokorný, 2015, s. 15, 19). Zajímavé také je, že se ve sladkých vodách neobjevuje téměř žádná bioluminiscence. Vzhled vydávajícího světla má přímou souvislost s prostředím, ve kterém bioluminiscenční organismus žije (Micalizio, 2013).

Dané organismy si ji buďto ve svém těle vytváří sami, nebo žijí v symbióze s jiným organismem, který toto záření vyváří za ně. Tento symbiotický vztah mají např. některé chobotnice a bioluminiscenční bakterie. Existují i organismy, které přijímají bioluminiscenční buňky až s potravou (Micalizio, 2013).

Jak už bylo zmíněno, během bioluminiscence vzniká pouze *studené světlo*. Nevytváří se při něm skoro žádné teplo (jen okolo 8 %). Zbytek energie se vyzařuje v podobě světla. Toto světlo pak můžeme vnímat v různých barevných spektrech, od červené až po modrou a fialovou (Močubová, 2008, s. 10). Jakou barvu světla pak organismus vydává, je závislé hlavně na hodnotě pH reakce (Šípek, 2013). V mořské vodě se většinou setkáme s vyzařováním barvy modré, protože je z mnoha důvodů v tomto prostředí nejvhodnější. Organismy, které žijí na souši, používají spíše barvy v odstínech žluté, zelené, a dokonce i červené

(Beckerová, 2018). Existuje i několik organismů, jako jsou např. tzv. railroad worms (larvy brouka rodu *Phrixothrix*), které používají k záření dvě různé barvy. Je to způsobeno tím, že mají v těle dva typy luciferázy. Na hlavě produkují barvu červenou a na zbytku těla barvu zelenou (Micalizio, 2013). Červenou barvu však mnoho členovců nevidí, špatně ji vnímají, a proto panuje názor, že larvy díky tomuto záření hledají potravu, např. mnohonožky (Šípek, 2013).

Bioluminiscence může být vykazována dvojím způsobem; buďto intracelulárně, nebo extracelulárně. Intracelulární bioluminiscencí je myšlen ten případ, kdy se světélkování odehrává přímo na určitých místech v těle daného organismu a může být k tomu i vytvořeno speciální ústrojí (Pokorný, 2015, s. 15). Takovéto ústrojí se nazývá *photophor* a jsou v něm koncentrovány světelné buňky (Močubová, 2008, s. 10). U organismů, které bioluminiscenci vykazují extracelulárně, nedochází k vyváření záření přímo v jejich buňkách, ale ve vyloučených sekretech. Takovým příkladem pak může být např. žížala podhorská (*Eisenia lucens*), která vylučuje z pokožky těla luminiscenční hlen (Pokorný, 2015, s. 15).

2.3 Chemická podstata bioluminiscence

Aby tato biochemická reakce v ideálním případě v těle organismu probíhala, je zapotřebí, aby byl v buňce přítomen substrát *luciferin* a enzym *luciferáza*. Nutno dodat, že tyto dvě látky nejsou u každého organismu naprosto stejné. Druh od druhu se liší stavbou a některými vlastnostmi. Luciferinem může být jako látkou myšlen alkohol, aldehyd, benzothiazoly i flaviny (Močubová, 2008, s. 12). Můžeme si ho představit jako tukovitou látku, kterou si organismus umí buďto syntetizovat sám, nebo ji musí přijímat od jiného organismu, který tyto bioluminiscenční vlastnosti má. Tento substrát pak má na svědomí, že se v reakci daná energie přeměňuje na světelný produkt (Bocáková, 2009, s. 226). Luciferin, který se vyskytuje např. u světlušek *Photinus pyralis*, je opticky aktivní látkou díky chirálnímu uhlíku ve struktuře. Může se vyskytovat ve dvou formách označovaných písmeny L a D. Obě formy mají rozdílné vlastnosti; v bioluminiscenční reakci se uplatňuje D forma, L forma působí na reakci inhibitně (Žižková, 2018).

Další důležitou složkou, která je v reakci nezbytná, je kyslík. Díky kyslíku se luciferin oxiduje na oxyluciferin. Celou tuto oxidaci katalyzuje už zmíněný enzym luciferáza (Bocáková, 2009, s. 226). Během oxidace vzniká excitovaný stav. Kyslík se částečně redukuje a luciferin přijímá jeho elektrony. Ty na krátkou chvíli přechází na vyšší energetickou hladinu. Dlouho tu ale nezůstanou a vrací se na svoji původní hladinu. V tuto chvíli se uvolňuje energie, která je u bioluminiscence z 92 % přeměněna ve světlo (Močubová, 2008, s. 10–12).

Celé reakci, proto aby správně fungovala, je nutné dodat také energii. Ta se dodává ve formě ATP (adenosintrifosfát). Množství dodané ATP pak také ovlivňuje intenzitu svícení (Šípek, 2013).

V některých bioluminiscenčních reakcích dochází k náhradě enzymu luciferázy za tzv. *fotoprotein*. Na rozdíl od luciferázy potřebuje fotoprotein ke katalyzaci reakce ještě přítomnost iontu vápníku. Jeho další vlastnosti stále zůstávají ve zkoumání biochemiků (Micalizio, 2013).

Existují také dva typy luciferázy, které se v reakci uplatňují. Luciferázu I. typu najdeme u zástupců z třídy hmyzu, luciferázu II. typu spíše u mořských druhů, kterými jsou např. žahavci. Jejich rozdíl spočívá v tom, jaký substrát je pro enzym vhodný. U I. typu je tímto substrátem luciferin a reakce pak probíhá tak, jak je popsána výše. Typickým představitelem, u kterého toto takhle bude probíhat, je světluška *Photinus pyralis*. U II. typu se substrátem stává látka koelenterazin a tento typ můžeme najít např. u medúzy *Aequorea victoria*. Tato reakce je o něco světelně intenzivnější, trvá ale o něco kratší dobu než reakce s luciferinem (Žižková, 2018).

Pokud reakce probíhá uvnitř buňky, je často nutná přítomnost kofaktoru, který je pro enzymatickou reakci esenciální. Typ kofaktoru se liší podle druhu organismu. U medúz je nezbytný vápenatý kationt (Ca^{2+}), u světlušek hořečnatý kationt (Mg^{2+}) s ATP nebo u obrněnek je tímto kofaktorem vodíkový kationt (H^{+}) (Widder a Falls, 2014, s. 3).

2.4 K čemu bioluminiscence organismům slouží

Důvodů k produkci bioluminiscenčního záření je hned celá řada. Jejich funkce se liší podle druhu, u kterého se vyskytuje. U mnoha druhů je ale produkce bioluminiscenčního záření stále záhadou (Pokorný, 2015, s. 15).

Jedním vysvětlením, proč organismy světlo produkují, je, že ho užívají jako obrannou funkci proti predátorům. Záblesky světla mají útočníka překvapit, rozptýlit jeho vidění, zmást ho, a umožnit tak rychlý únik anebo ho varovat před plánovaným útokem. Některé chobotnice v případě nebezpečí uvolní na nepřítele světelný oblak, který útočníka načas dezorientuje, a chobotnice má tak čas odplavat pryč. Podobně reagují třeba určité druhy stonožek, které zas vypouští světélkující hlen, který slouží jako návnada a poskytuje drahocenný čas pro únik (Oba a Schultz, 2014, s. 5–7). Vylučovaný hlen může někdy také sloužit k označení daného predátora; sliz se uchytí na tělo lovce a ten se sám zanedlouho stane kořistí, protože se najednou stane pro ostatní velmi dobře viditelný a je uloven dalším větším predátorem (Widder, 2010,

s. 704). Larvy světlušek produkují záření, aby predátora upozornily, že pro něj můžou být jedovaté. Takový typ chování se jinak nazývá aposematismus (Oba a Schultz, 2014, s. 7).

Další funkcí je nalákání kořisti na světelné záření či záblesky. Typickým představitelem tohoto typu je ďas mořský (*Lophius piscatorius*). Tato ryba má první tři paprsky hřbetní ploutve modifikovány v dlouhé útvary připomínající tykadla. Na prvním se nachází zvláštní světélkující útvar, který slouží jako návnada při lovu ryb. Ty jsou uloveny rychlým otevřením tlamy, ke které je kořist přilákána (Micalizio, 2013). Podle některých autorů (Oba a Schultz, 2014, s. 10) je důvod, proč se organismy v moři tak snadno nechají chytnout na světelnou návnadu, ten, že jim světlo připomíná potravu, např. tzv. „hlubokomořský sníh“ (zbytky organické hmoty, které bývají jedním z hlavních zdrojů potravy hlubokomořských organismů) (NOAA, 2020).

U některých druhů má světlo přilákat sexuálního partnera. Samičky světlušek se nabízí partnerům k páření natáčením svého svítícího hřbetního fotoforu (Oba a Schultz, 2014, s. 12). Podle způsobu záření samci dobře poznají samičky jen svého druhu, a nedochází tak k *„nežádoucímu mezidruhovému křížení“* (Šípek, 2013).

Dále může luminiscenční světlo sloužit pouze k orientaci jedince v prostoru. Toho využívají hlavně hlubokomořské druhy (Pokorný, 2015, s. 15). Tři rody hlubokomořských ryb *Malacosteus, Aristostomias* a *Pachystomias* využívají produkované světlo k lepšímu vidění ve velkých hloubkách. Pod očima mají umístěné fotofory, které produkují červené záření. Většina živočichů v moři není schopná červené světlo vidět, takže se dokážou dostat ke své kořisti prakticky nepozorovaně (Oba a Schultz, 2014, s. 13).

Další význam má bioluminiscence pro vodní organismy, které se potřebují maskovat. Uplatňuje se v místech, kam ještě proniká světlo. Tato technika maskování se nazývá protisvícení. Potenciální kořist, např. mořská ryba *Sternoptyx pseudobscura*, používá fotofory na svém těle, aby světelně splynula se svým pozadím (Oba a Schultz, 2014, s. 13). Produkuje stejnou intenzitu svícení jako světlo, které prostupuje vodou, takže se stává pro predátora skoro neviditelnou (Micalizio, 2013).

Některé méně dokonalé organismy vyzařují světelné záření jen náhodně a nedochází u nich k žádnému hlubšímu využití (Pokorný, 2015, s. 15). Může se u nich jednat o vedlejší produkt, který vznikl během metabolických dějů (Oba a Schultz, 2014, s. 14). Mnoho nových případů okolo bioluminiscence jsme schopni odhalit až dnes pomocí moderních technologií (Widder, 2010, s. 705).

2.5 Využití bioluminiscence ve vědě

V bioluminiscenci našla celá řada oborů praktické využití. V ekologii se využívá mořských bakterií, které vyzařují záření, aby pomohly zjistit znečištění vody či půdy toxickými látky (Pokorný, 2015, s. 19). Tyto biotesty fungují na principu „*závislosti inhibice bakteriemi emitovaného světla na koncentraci toxikantů v testovaném vzorku*“, dobře se s nimi pracuje, testy jsou jednoduché a přesné (Kafka a Punčochářová, 1999, s. 606).

V medicíně pomáhá diagnostikovat různá onemocnění. V nedávné době se začala používat experimentální metoda k detekci rakovinového bujení u zvířat. Těm se do těla vpraví geny s bioluminiscenční schopností získané např. od medúzy *Aequorea* (Močubová, 2006, s. 13). Používá se také ke zjištění přítomnosti mikroorganismů v moči nebo k testování vlivu antibiotik a vitamínu na bakteriální růst. Pomocí bioluminiscence se dokonce zkoumalo, zda se na planetě Mars nenachází nějaká stopa života (Widder a Falls, 2014, s. 5).

Někteří vědci vidí v bioluminiscenci ještě větší potenciál. Myslí si, že by nám tento proces mohl pomoci usnadnit život, třeba snížením některých zdrojů, jako je elektřina. Toho chtějí dosáhnout tak, že by stromy, které stojí podél cest a silnic, mohly nahradit pouliční osvětlení svým vlastním přirozeným zářením. Tato myšlenka je stále ale pouze předmětem zkoumání. Stejně jako ta, že by zemědělské plodiny mohly vysílat světelné záření, podle kterých by pěstitelé poznali, zda rostlina nepotřebuje třeba zalít. Náklady zemědělců by se tímto snížily a zároveň by docházelo k šetrnějšímu zacházení s vodou (Micalizio, 2013).

3 Bioluminiscence u bakterií

3.1 Obecná charakteristika

Bakterie s bioluminiscenční schopností nejčastěji obývají slané vody moří a oceánů. Nejfrekventovanějšími místy nálezu jsou jejich klidné oblasti, nejlépe pak v blízkosti pobřeží. Ve výjimečných případech se dají nalézt také ve vodách sladkých nebo na souši (Oba a Schultz, 2014, s. 23).

Často žijí v symbióze s vodními organismy, hlavně s rybami a chobotnicemi. Symbiotický vztah je pro bakterie výhodný tím, že získávají od svého symbionta potřebné živiny (Oba a Schultz, 2014, s. 23). Na oplátku svým zářením pomáhají hostiteli v komunikaci, lovení nebo úniku před nepřáteli (Widder, 2010, s. 704). Živočichové s bakteriálním zářením nedokážou vyzařované světlo korigovat dle své vůle na rozdíl od organismů, které samy produkují bioluminiscenci (Krönström, 2009, s. 3). Jedna z teorií vysvětlující, proč bakterie začaly používat bioluminiscenci, je, že se tímto způsobem chtěly chránit před kyslíkem, který se začal před 2,3 miliardami let hromadit v atmosféře. Nešlo jim tedy nejspíše primárně o emisi světelného záření. Bylo také zjištěno, že bioluminiscenční mechanismus produkující světlo „*stimuluje systémy opravující DNA v bakteriální buňce*“, takže ji bakterie využívají při ochraně své buňky (Sochor a Egertová, 2015, s. 284).

3.2 Chemismus

Bioluminiscenční bakterie mají společnou genovou sekvenci. Ta se nazývá *lux operon*. V tomto genetickém kódu je uložena biosyntéza bakteriální luciferázy (Widder a Falls, 2014, s. 3). Lux operon je složený z částí, které dohromady tvoří luxCDABE (Močubová, 2008, s. 25). Tyto geny jsou stejné pro všechny bakterie a jsou zcela nutné k produkci světla. Některé mají navíc doplňkové a regulační geny (Widder a Falls, 2014, s. 3).

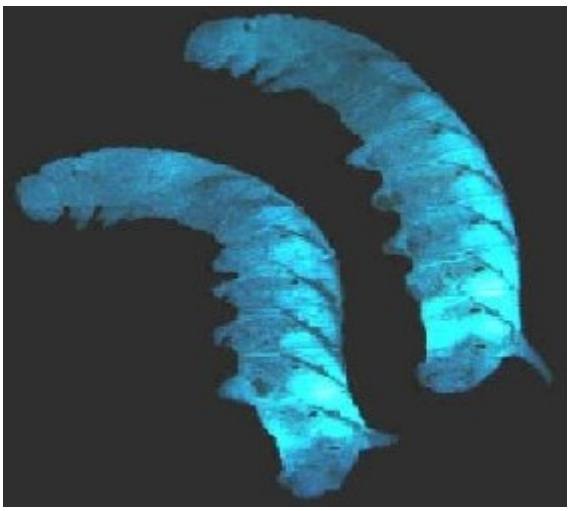
Kofaktory nutné ke správnému fungování bioluminiscence u bakterií jsou $FMNH_2$ a NADH. K reakci je dále také potřeba alifatický aldehyd s dlouhým řetězcem a přítomnost molekulárního kyslíku. Tyto látky se do organismu dodávají nepřetržitě. Díky této stálé dostupnosti je pak možné vyzařovat světlo nepřerušovaně, což je oproti ostatním organismům netypické. Většina produkuje záření spíše v záblescích. Emitované světlo vydávané bakteriemi má nejčastěji modrozelenou barvu (Widder a Falls, 2014, s. 3–4).

3.3 Zástupci

V současné době jsou známé 4 různé bakteriální rody, které jsou schopné bioluminiscence. Rod *Photorhabdus*, který je čistě terestrický a všechny jeho druhy vykazují luminiscenci, a tři mořské rody: *Vibrio, Photobacterium* a *Shewanella*. Poslední tři jmenované rody ve svém taxonu zahrnují i nesvítící druhy (Widder a Falls, 2014, s. 3).

Významnou vlastností těchto bakterií je tzv. *snímání kvora*. Bioluminiscenční bakterie ji využívají v době, kdy jejich počet není natolik vysoký, aby vyzařované světlo bylo viditelné. Bakterie v tu chvíli reakci nepoužívají a šetří si tím svou energii do té doby, než se dostatečně namnoží. Tuto zajímavou schopnost využívají i jiné nesvítící bakterie, např. nevykazují vysokou patogenitu do doby, než se jejich populace rozmnoží na takový počet, aby porazila obranyschopnost hostitele (Widder, 2010, s. 707–708).

Bakterie rodu *Photorhabdus*, žijící na souši, můžeme nalézt ve střevě parazitické hlístice rodu *Heterorhabditis*. Tato hlístice využívá jako hostitele hmyz. Bioluminiscence se může poté projevovat na mrtvém těle hmyzu, kde nejspíše plní aposematickou funkci nebo slouží k nalákání dalšího hmyzu, který by mohl sloužit jako hostitel, viz obr. č. 1 (Oba a Schultz, 2014, s. 16).



Obrázek 1- bioluminiscence způsobená bakterií rodu Photorhabdus na mrtvém těle hmyzu (Youle, 2009)

4 Bioluminiscence u obrněnek

4.1 Obecná charakteristika

Už ve starověku si tehdejší lidé všimli modrého záření, které se občas v noci vyskytovalo na mořské hladině. Za většinu této pozorovatelné záře mohou právě obrněnky, které se zde namnožily a při narušení hladiny emitovaly modré světlo (Valiadi a Iglesias-Rodriguez, 2013, s. 4).

4.2 Chemismus a funkce

Bioluminiscenční látky, které obrněnky používají, jsou soustředěné do organely zvané *sciontilon*. Těmi jsou opět luciferin, luciferáza (LCF) a u některých druhů i vazebný luciferinový protein (luciferin binding protein – LBP) (Valiadi a Iglesias-Rodriguez, 2013, s. 4). Luciferin u obrněnek je svou stavbou velmi podobný struktuře chlorofylu, což vede k názoru, že původ tohoto substrátu pochází z druhů vykonávajících fotosyntézu (Widder, 2010, s. 705). Má podobu tetrapyrolu s otevřeným řetězcem (Widder a Falls, 2014, s. 3). Bioluminiscence je vyvolávána smykovým napětím, tedy mechanickým narušením. Stát se to může např. rozčeřením vodní hladiny. Při reakci hraje velkou roli i pH ve sciontilonu (Valiadi a Iglesias-Rodriguez, 2013, s. 4–5).

Bioluminiscenční světlo je u většiny obrněnek nejjasnější v noci. K regulaci emitovaného záření používají vnitřní tzv. *cirkadiánní hodiny*; jen u druhů *Lingulodinium polyedrum a Pyrocystis lunula* dochází k regulaci jinými způsoby. U většiny obrněnek dochází také k *fotoinhibici*, díky které obrněnky poznají ideální dobu k bioluminiscenci a dochází tak k šetření energie, která by jinak byla vynaložena v neefektivní čas (Valiadi a Iglesias-Rodriguez, 2013, s. 12).

Dle Močubové (2016, s. 21) má bioluminiscence u obrněnek dvě obranné funkce: proti působení kyslíku, který by byl pro ně toxický, a proti případnému útoku predátora. Svým zářením jsou schopné přilákat jiného predátora, který by mohl napadnout již útočícího jedince, a tím umožnit obrněnce možnost úniku (Močubová, 2006, s. 21). Autoři Hanley a Widder (2017, s. 519) pracují rovnou se třemi hypotézami funkce bioluminiscence u obrněnek. Těmi podle nich jsou: vyvolat úlek v predátorovi, a tím získat čas k úniku, aposematický projev a přilákání sekundárního predátora. Tito autoři prováděli výzkum, který měl odhalit, jak souvisí koncentrace obrněnek s jejich bioluminiscenční funkcí. Předpokládají, že existuje určitá koncentrační hranice, kdy obrněnky využívají bioluminiscenci ještě jako aposematický projev, a kdy už je jejich koncentrace natolik vysoká, že je schopná přivolat dalšího predátora.

„*Výsledky této studie naznačují, že relativně nízká koncentrace bioluminiscenčních obrněnek způsobuje, že klanonožky (Copepoda) dávají přednost neluminiscenční kořisti, jako jsou rozsivky, čím poskytují obrněnkám možnou konkurující výhodu. Jakmile se obrněnky přemnoží do vysokých koncentrací (3000 buněk na 1 ml), klanonožky s pasením ustávají.*“ Z těchto výsledků se dá usoudit, že bioluminiscence u některých druhů, které tvoří vodní květy, hraje důležitou roli. Díky bioluminiscenci při vysokých koncentrací nedochází k požírání obrněnek jejich predátory (Hanley a Widder, 2017, s. 519, 529).

Jasnost záření závisí u většiny druhů na velikosti buňky obrněnky, protože čím větší buňka, tím větší množství sciontilon a větší množství emitovaného světla. S tím souvisí i větší počet luciferinu v buňce. Různé rody se tedy liší v množství produkovaného jasu, rozdílnost ale nacházíme i v rychlosti záblesků, které obrněnka emituje. U obrněnky *Noctiluca scintillans* se tato rychlost pohybuje kolem 80 milisekund, zato u obrněnky *Lingulodinium polyedrum* je toto číslo skoro dvakrát takové, tedy až 150 milisekund (Valiadi a Iglesias-Rodriguez, 2013, s. 13).

4.3 Zástupci

Podle tabulky č. 1 v práci Valiadi a Iglesias-Rodriguez (2013, s. 11) zabývající se bioluminiscencí obrněnek je celkový počet nahlášených bioluminiscenčních druhů 69. Celkově tabulka počítá s 523 druhy obrněnek. Rody *Ceratium* a *Protoperidinium* jsou sice v počtu celkových zástupců největšími z rodů, ale, co se týče bioluminiscenčních schopností, mnoho světélkujících druhů se v nich nevyskytuje. Řád Gonyaulacales přesto celkově obsahuje nejvíce bioluminiscenčních zástupců (Valiadi a Iglesias-Rodriguez, 2013, s. 11–12).

Order Family	Genus	No. of reported BL species	Total no. of species in genus
		Gonyaulacales	
Ceratiaceae	*(Neo)ceratium*	4	77
Goniodomaceae	*Alexandrium*	7	31
	Pyrodinium	1	1
Cladopixidaceae?	*Peridiniella*	1	3
Ceratocoryaceae	*Ceratocorys*	1	11
Gonyaulaceae	*Gonyaulax*	11	72
	Lingulodinium	1	2
Pyrocystaceae	*Pyrocystis*	4	16
Pyrophacaceae	*Fragilidium*	4	5
	Pyrophacus	1	4
		Gymnodiniales	
Gymnodiniaceae	*Polykrikos*	2	5
		Noctilucales	
Noctilucaceae	*Noctiluca*	1	1
		Peridiniales	
Proroperidiniaceae	*Protoperidinium*	31	295

Tabulka 1- tabulka zaznamenávající název řádu, čeledě, rodu, počet nahlášených bioluminiscenčních druhů a celkový počet druhů v rodě (Valiadi a Iglesias-Rodriguez, 2013, s. 11).

Obrněnka *Noctiluca scintillans* je heterotrofním zástupcem svého druhu. Do popředí zájmu vědců se dostala díky specifické stavbě své luciferázy. Na některých svých částech je enzym značně zredukovaný, dokonce i v té, která u jiných obrněnek zodpovídá za regulaci pH (Valiadi a Iglesias-Rodriguez, 2013, s. 8). Obývá vody kolem pobřeží, kde v noci vytváří zářivou podívanou, viz obr. č. 2 (Rogers, 2017). Tento „vodní květ" je ale kvůli produkovaným toxinům pro některé mořské živočichy velmi nebezpečný (Turkoglu, 2012, s. 710). Její potravou jsou různé mikroskopické vodní organismy jako rozsivky nebo bakterie (Rogers, 2017).

Obrázek 2- modré světélkující zbarvení moře způsobené obrněnkou Noctiluca scintillans (autor neznámý, 2015)

5 Bioluminiscence u hub

5.1 Obecná charakteristika

Krásám bioluminiscenčních hub podlehly již například domorodé kmeny z Mikronésie, které je sbíraly a používaly, jak při svých různých obřadech, tak jako válečné barvivo, kterým si potíraly tváře, aby zastrašily své nepřátele. Našly v nich i praktické využití. Jejich záření jim pomáhalo orientovat se ve tmě, označovaly si jejich světlem své cesty. Kromě určité úcty v nich ale tyto záhadné druhy probouzely i strach z neznámého, a proto je považovaly za zlé znamení (Sochor a Egertová, 2015, s. 284).

Určitou formu luminiscence využívá velké množství hub. U většiny je ale vyzařované světlo velmi slabé a pro jeho pozorování je nutné použít speciální měřicí přístroj (Sochor a Egertová, 2015, s. 284). Ta pravá bioluminiscenční schopnost byla u hub pozorována pouze v jednom oddělení, a to u stopkovýtrusných hub (Basidiomycota). V tomto oddělení bylo popsáno přes 70 druhů světélkujících hub, které se řadí k liniím *Omphalotus*, *Armillaria* a k tzv. mycenoidním houbám (Oba a Schultz, 2014, s. 16). Bioluminiscence je u všech hub vykazována pouze intracelulárně emisí světla jak z plodnice, tak z podhoubí. U některých druhů, a to převážně v rodu *Armillaria*, se projevuje však pouze světélkováním mycelia (Oba a Schultz, 2014, s. 16). Mladší houby vykazují vyšší intenzitu jasu než houby starší, se starší plodnicí a myceliem. Intenzita jasu je také ovlivněna konkrétním druhem a prostředím, ve kterém houba roste (Shimomura, 2012, s. 277).

5.2 Chemismus a funkce

Bioluminiscenční mechanismus u hub není stále úplně objasněný, je však zřejmé, že tento proces bude u všech druhů podobný, ne-li až stejný (Oba a Schultz, 2014, s. 16). Velmi se ale liší od mechanismů, které používají ostatní organismy. Podle jedné z možností je, že tyto houby mají určitý substrát neznámé stavby, který se pro zjednodušení obecně pojmenovává luciferin a ten je, podobně jako u ostatních organismů, oxidován za přítomnosti enzymů (Sochor a Egertová, 2015, s. 283). Jako druhou uvádí Sochor a Egertová (2015, s. 283) tu možnost, že mechanismus je prováděn taktéž „*oxidací organického substrátu, ale bez přítomnosti specializovaného enzymu*“.

Emitované světlo je vždy zelené barvy a jeho nejvyšší intenzita se nachází v rozmezí vlnových délek 520-530 nanometrů (Sochor a Egertová, 2015, s. 283).

Jakou funkci má bioluminiscence u hub je stále vědeckou záhadou, kterou se ještě nepovedlo experimentálně prokázat. Jednou z teorií, proč některé houby vyzařují bioluminiscenční světlo, je, že má sloužit jako jasný signál toho, že jejich konzumací by si potenciální strávník moc nepochutnal, ba dokonce naopak. Jako aposematický projev má všechny varovat, že jsou dané houby jedovaté, je to součást obranné strategie. U japonské houby *Omphalotus japonicus* však biolog Yuichi Oba pozoroval, že ačkoliv je tato bioluminiscenční houba pro lidi toxická, je součástí jídelníčku tamních brouků z čeledi drabčíkovitých. Zda tedy bioluminiscence těmto houbám má sloužit jako varovný projev se prozatím nedokázalo potvrdit (Oba a Schultz, 2014, s. 8). Další z možností je, že svítící plodnice je velmi atraktivní pro hmyz, který tak poslouží k rozšiřování houbových výtrusů do širokého okolí. Uložiště houbových spor často svítí ve zralosti nejjasněji; tato teorie však nevysvětluje světélkující mycelium. Další zajímavá hypotéza uvádí to, že svítící houba má přilákat predátory ze svého okolí, či dokonce fungioviry. Ačkoliv se tato úvaha zdá rozporuplná, fungioviry by se, v případě špatné poživatelnosti světélkují houby, rozhodly zkonzumovat jiný houbový druh v blízkém okolí, čímž by bioluminiscenční houbě pomohly zbavit se své konkurence. Přilákaní predátoři by zase houbě pomohli se zbavit vysokého počtu fungiovirů. Nakonec je nutno zmínit i tu možnost, že vyzařované světlo je u hub pouze vedlejším efektem některých metabolických reakcí (Sochor a Egertová, 2015, s. 283).

Obrázek 3- helmovka Mycena chlorophos za tmy (Sochor a Egertová, 2015, s. 283)

5.3 Zástupci

Nejvíce zástupců bioluminiscenčních hub roste v tropických oblastech. Druhy mírného podnebí se vyznačují často pouze světélkujícím myceliem. V České republice se můžeme ale setkat i s jedním druhem, u kterého lze pozorovat světélkování plodnice. Tímto druhem je hlívovník olivový žlutooranžový (*Omphalotus olearius* var. *illudens*). Jeho záření je dokonce pozorovatelné i bez nutnosti použití speciálních přístrojů. Roste na našem území ve velmi

teplých oblastech. Dalším bioluminiscenčním druhem rostoucím u nás je helmovka krvonohá (*Mycena haematopus*). Její světélkování je ale natolik slabé, že pro jeho zjištění je nutné použít speciální citlivé fotometrické přístroje (Sochor a Egertová, 2015, s. 282).

6 Bioluminiscence u bezobratlých

Bioluminiscenčních bezobratlých živočichů je velké množství. Pro tuto práci byly vybrány pouze některé druhy, které autorka vyhodnotila jako nejreprezentativnější.

6.1 Žahavci a žebernatky

Těla těchto organismů jsou tvořena z dvojité vrstvy buněk obklopujících trávicí láčku, též někdy nazývanou jako *coelenteron*. V anglicky psané literatuře jsou proto tyto organismy dohromady označovány jako tzv. *Coelenterates*. Mnoho druhů z této skupiny vykazuje bioluminiscenční vlastnosti. Výjimku tvoří pouze mořské sasanky a korály (Shimomura, 2012, s. 91).

Žahavci a žebernatky k bioluminiscenci používají substrát, který se dle pojmenování skupiny nazývá coelenterazin. Ten je však včetně zástupců těchto dvou kmenů využíván i jinými druhy organismů. Daný substrát byl nalezen u měkkýšů, konkrétně např. u druhu *Watasenia scintillans*, dále u členovců, kde ho využívá celá skupina klanonožců nebo některé lasturnatky (např. *Conchoecia*), a dokonce u některých strunatců. Využíván je i rybami z čeledi lampovníkovitých (Myctophidae). Zajímavostí je, že coelenterazin využívají pouze mořské organismy a nebyl zatím objeven u žádného organismu sladkovodního či suchozemského (Oba a Schultz, 2014, s. 24).

Ne všechny organismy si dokážou samy ve svém těle coelenterazin vytvořit a musejí ho přijímat spolu s potravou. To je i případ medúzy *Aequorea victoria*, která bez příjmu potravy začne po čase bioluminiscenční schopnost ztrácet. Je pravděpodobné, že tyto druhy získávají substrát z klanonožců, jako je např. druh *Metridia pacifica* (Oba a Schultz, 2014, s. 24–25).

Ukázkovým zástupcem bioluminiscenčních žahavců je výše zmíněná medúza *Aequorea aequorea (victoria)*. Tento oceánský druh, který je velmi hojně rozšířen v mnoha oblastech, má své fotofory umístěné po okrajích těla. Pro reakci je u této medúzy nutná přítomnost vápenatého kationtu a fotoprotein zvaný aequorin (Shimomura, 2012, s. 93–95). Tento protein má v sobě velké množství energie, kterou uvolňuje za přítomnosti Ca^{2+} prostřednictvím světla. U této reakce není podstatná přítomnost kyslíku. Při rozkladu aequorinu vzniká coelenteramid, apoekvorin, oxid uhličitý a je emitováno světelné záření o vlnové délce 465 nm. Coelenteramid

způsobuje modrou fluorescenci (Shimomura, 2012, s. 101). Samotná struktura aequorinu je složitá a složení není homogenní, ale poskládané z mnoha druhů izoformů (Shimomura, 2012, s. 102). Ačkoliv je emitované světlo z proteinu aequorin modré barvy, světelné záření z medúzy *Aequorea* má barvu zelenou. Za tímto jevem stojí zelený fluorescenční protein (GFP). Aequorin i GFP jsou velmi zkoumanými proteiny, na kterých se provádí ve výzkumu mnoho testů a šetření (Shimomura, 2012, s. 130).

Obrázek 4- medúza Aequorea victoria (Profimedia.cz, 2017)

6.2 Kroužkovci

Z tohoto živočišného kmenu byly vybrány ukázky bioluminiscence ze tříd máloštětinatců (Oligochaeta) a mnohoštětinatců (Polychaeta).

U máloštětinatců je známo asi 16 druhů schopných bioluminiscence. Důvodem k této reakci organismu je nejspíše obrana proti predátorům. Světelné záření má útočníka vylekat, zmást ho a umožnit tak např. žížale rychle uprchnout. Stačí žížalu mechanicky podráždit a začne z těla (především z okolí úst a řitě) vypouštět hlen, který v sobě obsahuje luminiscenční látky (Oba a Schultz, 2014, s. 17).

Mořští mnohoštětinatci rodu *Odontosyllis* využívají při své obraně bioluminiscenci více způsoby. Vypuštěním světelného hlenu se snaží protivníka dezorientovat a využít momentu překvapení pro únik. Byly pozorovány i případy, kdy při útoku tento červ odvrhl kus svého těla, kde měl umístěné své světelné orgány. Útočník se tak začal zabývat pouze odvrhnutou částí a mnohoštětinatec opět mohl využít čas k ukrytí. Někteří predátoři si světelné záření zase vyloží jako varovný projev toho, že červ není chuťově dobrý, a tak raději odplouvají pryč (Oba a Schultz, 2014, s. 9). Nadále těmto mnohoštětinatcům slouží emitované zelené záření jako

atraktivní lákadlo během rozmnožování. Například jistý druh z rodu *Odontosyllis* produkuje bioluminiscenční záření během doby páření, kdy ze dna moří, které obývají, vyplouvají k povrchu. Samičky začnou emitovat světlo pomocí hlenu, který přitahuje samce tohoto druhu. V hlenu od samiček jsou obsažené pohlavní buňky, do nichž samečci vypouští vlastní světélkující tělní tekutiny s gamety (Deheyn a Latz, 2009, s. 31–32).

6.3 Měkkýši

Plž druhu *Quantula striata* z čeledi Ariophantidae je jedním z většího množství zástupců bioluminiscenčních měkkýšů. Známý je také pod názvem *Dyakia striata* a světlo emitují hlavně mladí jedinci. Žije v tropech jihovýchodní Asie, důvod bioluminiscence není u těchto suchozemských druhů bohužel přesně známý (Oba a Schultz, 2014, s. 14).

Jak již bylo psáno, ve sladkých vodách je bioluminiscence opravdu vzácný jev. Proč tomu tak je, je stále velkou záhadou. V oceánech a mořích přitom najdeme početně nejvíce bioluminiscenčních zástupců ze všech biotopů. Výjimkou je drobný plž druhu *Latia neritoides* z Nového Zélandu. Náleží do čeledi Latiidae. Je jediným známým bioluminiscenčním druhem obývajícím sladké vody. Žije přichycený ve vodě na kamenech a patří mezi druhy vykazující bioluminiscenci extracelulárně, konkrétně hlenem. Pravděpodobně se opět jedná o způsob ochrany před predátory. Hlen je vypouštěn do vody, s proudem odtéká pryč, a dravec se tak může snadno zmást falešnou stopou (Oba a Schultz, 2014, 17–19).

6.4 Členovci

Stonožkovci, korýši a šestinozí jsou nejčastější a nejznámější podkmeny členovců, u kterých se projevuje bioluminiscence. Z každého podkmene byli vybráni reprezentující představitelé.

Lasturnatka *Vargula hilgendorfii* je drobným zástupcem podkmene korýšů, který předvádí svá bioluminiscenční kouzla u pobřeží Japonska. Využívá je především jako obranný mechanismus. Tento korýš, patřící do čeledi Cypridinidae, vystřikuje bioluminiscenční proud na svého útočníka ze dvou žláz. Jejich bioluminiscenční chemický mechanismus patří k těm nejjednodušším a zahrnuje klasické reaktanty: „*Luciferáza navázaná na luciferin s kyslíkem vytváří peroxid, který rychle cyklizuje za vzniku přechodného cyklického peroxidu… jeho rozpad je zdrojem energie potřebné k vytvoření oxyluciferinu v excitovaném stavu.*“ (Wilson a Hastings, 2013, s. 9–15).

Z podkmene stonožkovci je známo asi 24 bioluminiscenčních druhů (Oba a Schultz, 2014, s. 15). Stonožkovci emitování světelného záření používají jako projev aposematismu. Při podráždění světélkují a vypouští jedovaté látky. Stonožka druhu *Paraspirobolus lucifugus*

má umístěné fotofory mezi svými tělními články a na svou obranu používá včetně modrozeleného záření i nepříjemný zápach (Oba a Schultz, 2014, s. 8).

Naprosto největší skupinou organismů, u kterých se můžeme s bioluminiscencí setkat, je hmyz. V hmyzí říši v této schopnosti dominují brouci (Coleoptera). Početně vysoce převyšují další řád, u kterého se bioluminiscence může vyskytovat také, a tím jsou dvoukřídlí (Diptera), kde světlo zde umí emitovat zhruba 10 druhů (Bocáková, 2009, s. 226).

Se zajímavým bioluminiscenčním hmyzem se můžeme setkat na Novém Zélandu, a to s bedlobytkou novozélandskou *Arachnocampa luminosa* z čeledi Keroplatidae, která v této zemi představuje vyhledávanou turistickou atrakci. Jedná se o endemický druh, který se vyskytuje pouze zde; v sousední Austrálii žije osm příbuzných druhů. Nalézt její larvy můžeme ve vlhkých lesních oblastech, u mírně tekoucích vod nebo v tmavých jeskynních. Larvy jsou dravé a technika jejich lovu spočívá v lákání kořisti na vyzařované modrozelené světlo. Světelné orgány vzniklé přeměnou malpigických trubic mají umístěné na zadní straně těla u zadečku (Watkins, Sharpe, Perry a Krause, 2018, s. 1–2). Samy se však díky tomu stávají kořistí některých dravců, kteří v jeskyních hledají potravu, např. se jedná o pavoukovce australosekáče (*Megalopsalis*) z čeledi Neopilionidae. Dospělci této bedlobytky světélkování používají v době páření (Oba a Schultz, 2014, s. 12). V bioluminiscenční reakci se u nich uplatňuje luciferin, který je strukturně naprosto jiný než u ostatních světélkujících organismů, díky čemuž je tento hmyz často předmětem zájmu různých výzkumů (Watkins, Sharpe, Perry a Krause, 2018, s. 1).

Většina lidí si pojem bioluminiscence většinou spojí se známou skupinou v řádu brouků, se světluškovitými (Lampyridae). V této čeledi světélkuje naprosto každý druh, ať už jako dospělec či pouze jako larva. To stejné se ale nedá říci o dalších zástupcích bioluminiscenčních brouků, o kovařících (Elateridae). Z této čeledi mají pouze některé druhy ze skupin *Pyrophorini* a *Hapsodrilini* dokonale vyvinuté orgány k produkci světla (Bocáková, 2009, s. 226).

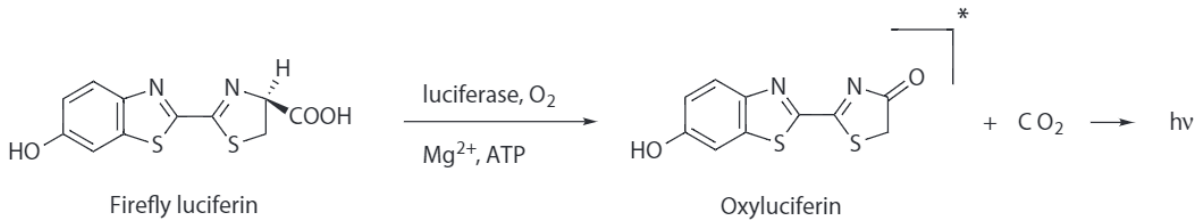
Z celkem početné čeledi světluškovití, čítající okolo dvou tisíc druhů, se v České republice můžeme setkat pouze se třemi z nich. Jedná se o světlušku menší (*Phausis splendidula*), náš nejběžnější druh, světlušku větší (*Lampyris nocticula*) a světlušku krátkokřídlou (*Phosphaenus hemipterus*). Všechny zmíněné druhy mají dobře vyvinutý světelný orgán produkující žlutozelené světlo. Samečci světlušek oproti samičkám létají, výjimkou jsou samečci světlušek krátkokřídlých, kteří jsou díky tomu špatně rozpoznatelní od svých samiček. Samičky se velmi

podobají svým larvám, rozeznat je lze podle světlejší barvy těla a velikých složených očí. Jejich larvy jsou velmi dravé, potravou jim může být dokonce menší plž (Škorpík, 2014).

Světlušky obývají především vlhká místa, kde je dostatek vegetace a potravy. Těchto míst však u nás bohužel ubývá, dochází k vysoušení mokřadů a vlhkých luk, které se mění na orná pole, dochází k častějšímu používání chemikálií v jejich okolí. Světlušky tedy přichází o své přirozené biotopy a pomalu z přírody ustupují. Velikou škodu jim také způsobuje umělé noční osvětlení; samečci hledající samičky k páření jsou tímto světlem dezorientovaní (Škorpík, 2014).

Skrze vědecká pozorování se ukázalo, že světélkování u světlušek probíhá pouze za tmy a je ovlivňováno vnějšími podmínkami okolí, jako je teplota vzduchu či síla větru. Světlušky si svit umí regulovat samy pomocí připouštění nebo omezování přísunu kyslíku do světelného orgánu. Světélkování lze často pozorovat jako řetězovou reakci. Když se rozsvítí jeden jedinec, jeho blízké okolí začne také svítit a postupně se tak rozsvítí celý roj. Důvod této kaskádovité reakce, ani spouštěcí moment nejsou stále objasněny a vyvolávají v lidech senzaci (Poláková, 2021).

V publikaci Bioluminescence: Living Lights, Lights for Living od Thérèse Wilson a J. Woodland Hastings (2013, s. 32) je o bioluminiscenční reakci světlušek uvedeno: „*Luciferin světlušek je stejný pro všechny ostatní bioluminiscenční brouky. Molekulou je benzothiazoylthiazol, jehož reakce s ATP a kyslíkem vytvoří oxidovaný oxyluciferin, který emituje světlo. Chemicky se tento luciferin nepodobá cypridinidovému luciferinu, coelenterazinu, ani žádnému jinému známému luciferinu. Luciferáza světlušek katalyzuje dvě po sobě jdoucí reakce. Pro první jsou potřeba ionty hořčíku (Mg^{2+}), dochází k tvorbě meziproduktu luciferyl adenylate, ... Následuje reakce s kyslíkem za vzniku nestabilního cyklického peroxidového meziproduktu, po jehož rozpadu se uvolňuje energie pro vyzařované světlo ... Stejně jako ve všech bioluminiscencích má opět role kyslíku a peroxidů jedinečný význam.*“



Obrázek 5- bioluminiscenční reakce u světlušek (Wilson a Hastings, 2013, s. 32)

Barva emitovaného světla u brouků záleží na jeho druhu a může nabývat barev od zelené po červenou. U této skupiny není barva ovlivněna žádným proteinem, jako je tomu třeba u medúzy *Aequorea aequorea* (Wilson a Hastings, 2013, s. 31).

Důvodů k světélkování mají světlušky hned několik. Nejčastějším důvodem je, že si světlušky pomocí bioluminiscence hledají sexuální partnery. Každý druh z této čeledi má jiný styl světélkování. Ačkoliv naše světlušky svit skoro nepřerušují, světlo vyzařují v letu trvale, světlušky z jiných částí světa, jako např. z Ameriky, spíše „blikají". Emitované záblesky se liší intenzitou, vlnovou délkou a intervaly (Bocáková, 2009, s. 226). Jedná se celkem o přesnou identifikaci, díky které se příroda snaží předcházet mezidruhovému křížení. U světlušek také k takovému mísení druhů skoro nedochází, jednotlivé druhy se dají často rozpoznat až podle důkladné analýzy (Šípek, 2013). Podle vlastností vydávaných záblesků se tedy mezi sebou rozpoznávají jednotlivé druhy a samičkám se tak usnadňuje hledání protějšku (Bocáková, 2009, s. 226). Samičky rodu *Photuris* tohoto identifikačního znaku umí však zneužít i k jiným důvodům. Svoje vysílané záblesky si upraví tak, aby na ně nalákaly nic netušící samečky z jiných druhů. Místo páření však tyto samečky čeká smrt, samičky je snědí (Šípek, 2013).

Často světélkují také nedospělé larvy. V jejich případě se však jedná o obranný mechanismus před predátory. Světlo má potencionálního strávníka překvapit, larvě dát tak možnost k útěku, zastrašit ho a vyvolat v něm pocit nechutenství z minulé zkušenosti se svítícím živočichem, který byl nechutný (Bocáková, 2009, s. 226).

Obrázek 6- světluška největší (Lampyris noctiluca) (Krejčík, 2009)

Ačkoliv by mnoho lidí soudilo, že světélkující hmyz si je kvůli takto výrazné společné vlastnosti velmi příbuzný, výzkumy DNA potvrdily opak. I přes velkou celkovou podobnost světlušek s dalšími bioluminiscenčními druhy brouků z čeledí Phengodidae a Rhagophthalmidae nepojí tyto druhy žádné silné příbuzenské pouto. Překvapením bylo, že jsou tyto druhy více spřízněné spíše s čeledí kovaříkovitých, i když vzhledově si podobní příliš nejsou. Zjistilo se tedy, že vlastnost světélkování se u těchto brouků vyvinula nezávisle na sobě. Všechny vyjmenované však spojuje společná nadčeleď Elateroidea (Bocáková, 2009, s. 227).

7 Bioluminiscence u obratlovců

7.1 Obecná charakteristika

V tomto rozsáhlém podkmenu je přirozená bioluminiscence zastoupená u ryb a u jednoho z řádů paryb, konkrétně u žraloků. U ryb je známo okolo 45 čeledí čítajících přibližně 1500 bioluminiscenčních druhů, z valné většiny patřících mezi ryby kostnaté (Teleostei) (McKee, 2014, s. 9 a Paitio, Oba a Meyer-Rochow, 2016, s. 298). Zjistit přesný počet druhů s touto schopností je velmi těžký. Zmatky způsobují hlavně autoři odborných prací, kteří se často neshodují ve svých názorech, a to co jeden označí jako světélkující druh, druhý autor ve své publikaci vyvrací. Chyby v úsudku mohou způsobovat i špatně identifikované vzorky. Jedním z takto chybně určených druhů a mylně tak dlouho řazených mezi bioluminiscenční byli žraloci rodu *Somniosus*, žralok velkoústý (*Megachasma pelagios*), který má ve své tlamě reflexní tkáň k odrazu světla, nebo ryby rodů *Bathylychnops* či *Dolichopteryx* z čeledi strašíkovitých (Opisthoproctidae) (Paitio, Oba a Meyer-Rochow, 2016, s. 302).

Bioluminiscence se u ryb v průběhu let vyvinula několikrát, u paprskoploutvých ryb konkrétně čtrnáctkrát. Známé jsou bioluminiscenční linie již z období druhohor (Davis, Sparks a Smith, 2016, s. 3, 6).

Nejčastěji bioluminiscenční druhy ryb nacházíme ve vodách hloubky 300 až 1000 metrů, kde už dochází k úbytku přirozeného denního světla a schopnost umět si vytvořit jeho vlastní zdroj je tak velmi výhodná (McKee, 2014, s. 9). Adaptace ryb na temné, tmavé mořské prostředí přinesla širokou škálu nejrůznějších projevů bioluminiscence v živočišné říši. Samotné vidění ryb v tomto prostředí je velmi ovlivněno vnějšími podmínkami; sluneční svit je zde tak vzácný, že přizpůsobení se temnotě hraje velikou roli v otázce přežití daného druhu. Světélkování je tak přirozený fylogenetický vývoj, který se podřídil nepříznivému okolí. Energie investovaná do světélkování však nesmí být příliš veliká a samotný svit by měl být jen tak silný, aby na sebe jedinec nepřilákal predátory (Paitio, Oba a Meyer-Rochow, 2016, s. 297–298, 303).

7.2 Chemismus a funkce

U ryb je umístění, anatomie a morfologie fotofor velmi různorodá, stejně jako způsob produkce záření. U ryb, které jsou schopny bioluminiscence, jsou fotofory s fotocyty nejčastěji umístěné na stranách, podél těla, nebo na ventrální straně těla, na břiše. Uloženy však mohou být prakticky kdekoliv na těle, často i na hřbetě, na ploutvích nebo na hlavě. Mohou nabývat podob od malých útvarů na těle až po složité struktury. Složitější fotofory jsou opatřeny i čočkou či duhovkou k řízení emitovaného světla. U většiny ryb, které mají nad bioluminiscencí vlastní

kontrolu, jsou fotofory řízeny nervovou soustavou (McKee, 2014, s. 9). Bioluminiscenční reakce je umožněna přítomností určitých substrátů. U ryb může tento substrát nabývat vícero podob. Nalézt u nich můžeme třeba luciferin podobný tomu, který mají i lasturnatky rodu *Cyoridina* (spíše u pobřežních ryb), coelenterazin (např. u Myctophiformes, kam patří mimo jiné lampovníkovití) nebo jiný substrát podobný luciferinu (Paitio, Oba a Meyer-Rochow, 2016, s. 305).

Mnohé druhy ryb si světélkování řídí samy, avšak přibližně třetina bioluminiscenčních ryb k tomu využívá bioluminiscenční bakterie, které uchovávají ve zvláštních strukturách (McKee, 2014, s. 9). Tyto symbiotické bakterie přežívají v kanálcích světelných orgánů, kde generují extracelulárně svícení. Nejčastější symbiotické bakterie jsou rodu *Photobacterium*. Bakterie emitují světelnou zář buďto nepřetržitě, nebo mohou mít ryby na svých strukturách, kde bakterie přebývají, částečně nebo úplně překrývající tkáň s chromatofory. Ryba si tkáň pomocí stahů svalstva koriguje a může tak měnit intenzitu světla. Zjednodušeně řečeno, tkáň funguje na principu „žaluzií“. Další možností regulace pro nesamostatně světélkující ryby je omezování přísunu živin bakteriím (Paitio, Oba a Meyer-Rochow, 2016, s. 305–306).

Barva emitovaného záření je u ryb nejčastěji modrozelená, je však proměnlivá podle toho, v jaké hloubce organismus žije. U pobřežních a epipelagických ryb je světlo spíše zelené a čím hlouběji ostatní druhy žijí, tím je světélkování modřejší. U některých druhů čeledi světlonošovití (Stomiidae) jsou známé i případy vyzařovaní červené barvy (Paitio, Oba a Meyer-Rochow, 2016, s. 309).

U ryb existuje veliké množství možností, jak bioluminiscenční záření využít ke svým potřebám. Jak již bylo popsáno v kapitole „K čemu bioluminiscence organismům slouží“, u ryb se jedná hlavně o techniku lovu za pomoci světelných orgánů či o určitou formu kamufláže, kdy při přizpůsobení intenzity emitovaného světla z fotoforů k intenzitě slunečního svitu přicházejícího od hladiny vody se ryba pro ostatní při pohledu zdola stává prakticky neviditelnou (McKee, 2014, s. 10). S tímto chováním se můžeme setkat spíše u epipelagických či mezopelagických ryb, které nežijí ve velkých hloubkách vod a tělo mají z boků velmi stlačené, jako jsou např. plošákovití (Leiognathidae) (Paitio, Oba a Meyer-Rochow, 2016, s. 310).

Důležitá může být bioluminiscence také při orientaci ryb v tmavých vodách (McKee, 2014, s. 10). Strategicky umístěné světelné orgány slouží jak k hledání potravy, tak k detekci predátorů. Pestrosvítivec pestrý (*Malacosteus niger*) využívá ke shánění kořisti zelené záření vycházející z malých fotoforů kolem úst. Zelené světlo je pro hlubinné rybky dobře viditelné, takže kořist se snadno nechá touto návnadou nalákat. Pod očima má však tato ryba ještě další

fotofory, daleko větší, které však emitují červené světlo. Díky tomuto světlu se pestrosvítivec dokáže snadno orientovat, najít si potravu a vyhnout se při tom případným útočníkům, kteří ho nevidí, protože je pro ně červená barva neviditelná (Paitio, Oba a Meyer-Rochow, 2016, s. 310).

Další funkcí je možný aposematismus. Ryby rodu *Porychtys* chtějí bioluminiscencí predátora upozornit, že mají jedovaté hřbetní trny a útok by se mu tak nemusel vyplatit. Známé jsou i případy, kdy ryby v případě ohrožení vypouštějí do vody kolem sebe světelnou tekutinu nebo začnou vydávat silné záblesky ke zmatení nepřítele (oči hlubinných ryb nejsou na intenzivní záblesky přizpůsobené, takže mohou být dočasně oslepené). Takovéto chování můžeme najít např. u čeledi světlonošovití (Stomiidae) (Paitio, Oba a Meyer-Rochow, 2016, s. 310–311).

Světélkování může sloužit také ke komunikaci a k druhovému rozpoznávání, které je důležité k případnému páření (Paitio, Oba a Meyer-Rochow, 2016, s. 309).

7.3 Zástupci

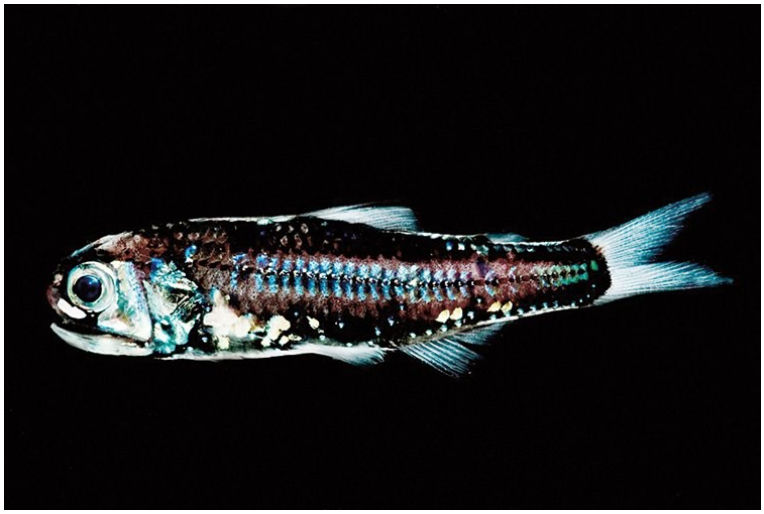
Jedněmi z nejznámějších bioluminiscenčních ryb jsou hlubinní ďasové (*Ceratiodei*), kteří využívají symbiotické bakterie k bioluminiscenci. Bakterie mají uložené v útvarech vytvořené na konci hřbetní ploutve. Tento útvar se odborně nazývá *esca* (návnada). U různých druhů může mít esca jinou podobu (Davis, Sparks a Smith, 2016, s. 4).

Hlubinné ryby kulovníci rodu *Himantolophus* (čeleď Himantolophidae) se také řadí mezi ryby, které si neumí bioluminiscenční světlo vytvořit samy a využívají tak symbiotického vztahu s bakteriemi. Ty mají umístěné ve světélkujícím orgánu na konci svého modifikovaného prvního paprsku z hřbetní ploutve. Světélkující bakterie produkují světlo v hloubce, kam již těžko proniká denní svit, kořist je světlem tak zaujatá, že si ani pomalu nevšimne velmi blízkého nebezpečí. Tento způsob lovu používá vícero druhů ryb a také některé další mořské organismy jako třeba chobotnice rodu *Stauroteuthis* (Oba a Schultz, 2014, s. 10).

Bradovousi rodu *Linophyrne* (čeleď Linophrynidae) mají včetně escy vyvinuté na spodní čelisti dlouhé bioluminiscenční vousy. Bioluminiscenční záření v útvaru na čelisti si tento rod vytváří sám, bakterie má pouze v esce (Davis, Sparks a Smith, 2016, s. 4).

Zástupci čeledi plošákovitých (*Leiognathidae*) mají specializovaný světelný orgán s bakteriemi uložený na jícnu. Tento útvar je u samic morfologicky odlišný než u samců, díky čemuž jsou od sebe dobře odlišitelní (Davis, Sparks a Smith, 2016, s. 4).

Lampovníkovití (Myctophidae, angl. lanternfish) je čeleď ryb, ve které je obsaženo nejvíce bioluminiscenčních rodů. Tyto ryby v době svého tření využívají světelné záření jako identifikační znak toho, že jsou připravené k tomuto aktu, a také k rozlišení jednotlivých druhů mezi sebou podobně, jako je tomu u světlušek. Podle umístění světelného orgánu na ocasní ploutvi se rozeznají mezi sebou samice se samcem. Samci mají fotofor umístěný na vrchu ploutve a vyzařuje intenzivnější světlo, zatímco samice ho má na spodní části této ploutve (McKee, 2014, s. 9–10).



Obrázek 7- lampař kalifornský (Diaphus theta) (Profimedia.cz, 2017)

8 Bioluminiscence jako téma v učebnicích přírodopisu na ZŠ a nižších stupních gymnázia

Vybrala jsem si a procházela dle mého názoru nejčastěji používané učebnice přírodopisu, se kterými se na základních školách nebo nižších stupních gymnázia ve výuce pracuje. Hledala jsem, zda se v těchto učebnicích vyskytují nějaké informace přímo o bioluminiscenci nebo bioluminiscenčních organismech. Zaměřila jsem na učebnice pro 6. a 7. ročník ZŠ a odpovídající ročníky víceletých gymnázií, kde se nejvíce probírá zoologie a botanika. V tomto výčtu čtenáře seznámím se zkoumanými učebnicemi, zda se v nich o bioluminiscenci píše a popřípadě konkrétně co.

8.1 Učebnice pro 6. ročník ZŠ a primu víceletých gymnázií

1) Přírodopis 6 pro základní školy – Zoologie a botanika od Vladimíra Černíka a kol., nakladatel SPN, Praha, z roku 2007. V této učebnici se o bioluminiscenci můžeme něco dozvědět v kapitole věnující se hmyzu, konkrétně u článku se světluškami: „*Světlušky jsou rozšířeny hlavně v tropech a subtropech, ve střední Evropě žijí pouze tři druhy. Světlušky jsou nápadné světélkováním larev i dospělců. Svítící plošky mají na spodní straně zadečkových článků. Okřídlení samečkové je rozsvěcují a zhášejí za letu, bezkřídlaté samičky odpovídají ve stejném rytmu na zemi. Světélkování je složitý chemický děj a slouží k vyhledávání jedinců opačného pohlaví. Nejhojnější u nás je světluška menší.*“ V učebnici se už o bioluminiscenci autoři nezmiňují, avšak aspoň toto krátké shrnutí u tak reprezentativního jedince, jakým je světluška, je dle mého názoru na místě a je zde podáváno jako zajímavá informace navíc.

2) Přírodopis 6 pro ZŠ a víceletá gymnázia od Ivany Pelikánové a kol., nakladatel Fraus, Plzeň, z roku 2014. V této učebnici je o bioluminiscenci opět zmínka u kapitoly věnující se hmyzu a světluškám: „*Každý už asi viděl světlo dalšího brouka – světlušky. Tento našedlý brouk v noci krásně světélkuje, což mu umožňuje chemická látka luciferin. U světlušek létá pouze sameček, samička je bezkřídlá.*“ Na rozdíl od předešlé učebnice od autorů V. Černík a kol. v této učebnici není o bioluminiscenci uvedeno tolik informací. Dle mého názoru zde chybí hlavně vysvětlení základního důvodu, proč vůbec světlušky světélkování používají. Kladně hodnotím uvedení informace, že je v této činnosti důležitá látka luciferin, avšak některým žákům by z této věty mohl uniknout fakt, že se tedy jedná o složitý chemický děj. Pro přiblížení a jako informace navíc ke světluškám jsou v liště na okraji stránky uvedeny otázky týkající se dlouhodobého

projektu Nadačního fondu Českého rozhlasu s názvem Světluška („*Komu tento projekt pomáhá?*“) a o knížce Broučci, kde se v příběhu hovoří o svatojánských broučcích („*Proč se jim říká „svatojánští*“).

3) Přírodopis pro 6. ročník základní školy a primu víceletého gymnázia od Věry Čabradové a kol., nakladatel Fraus, Plzeň, z roku 2003. Přestože už nakladatelství Fraus vydalo novou učebnici přírodopisu, stále se na některých školách můžeme setkat s touto verzí. O světélkování je zmínka ve stejné části učebnice jako ve verzi novější, text je v této pasáži naprosto stejný. Jediným rozdílem je, že v postranní liště chybí informace o nadačním fondu Světluška.

4) Přírodopis pro 6. ročník ZŠ od Eduarda Kočárka a kol., nakladatel Jinan, Úvaly, z roku 1998. Tato učebnice už na první pohled zaujme jinak řazeným učivem, např. celá kapitola hmyz není dělená na hmyz s proměnou nedokonalou a hmyz s proměnou dokonalou s výčtem zástupců, ale druhy jsou rozděleny podle biotopů, ve kterých se přirozeně vyskytují, tj. Hmyz vázaný na vodní stanoviště, Hmyz zahrad a ovocných sadů, Hmyz lidských obydlí apod. V této učebnici jsem našla tyto informace k biochemickému ději bioluminiscence: „*Světélka letních večerů. Pokud jste za teplého letního večera vydali do lesa, možná se vám poštěstilo zahlédnout podivuhodná světélka vznášející se mezi stromy nebo skrývající se v keřích… Na břišní části těla (světlušky) jsou dvě světelné skvrny, v nichž dochází ke složitému chemickému procesu, při němž se uvolňuje část energie ve formě světla. Světluška ovšem může tuto svoji „lucerničku“ kdykoliv „rozsvítit“ nebo „zhasnout“ podle potřeby…* “. Opět chybí nastínění, k čemu světélkování slouží, na rozdíl od ostatních je zde však vysvětleno, že světlo, které se během reakce uvolňuje, je vlastně energie z reakce v jiné formě, a že světlušky mohou tuto reakci ovládat dle svých přání.

5) Přírodopis 6, 2. díl Bezobratlí živočichové, pro 2. pololetí 6. ročníku základních škol a odpovídající ročníky víceletých gymnázií od Roberta Vlka a kol., nakladatel NOVÁ ŠKOLA, s. r. o., Brno, z roku 2018. Učebnice má kapitoly podobně řazené, jako je tomu u učebnice Přírodopisu pro 6. ročník ZŠ od Eduarda Kočárka a kol. Kapitoly jsou rozděleny podle stanovišť, kde daný živočich přebývá. Světlušky jsou tedy v kapitole Bezobratlí živočichové žijící v lese a je zde o nich psáno: „*Na okraji lesa se v létě můžeme setkat s brouky zvanými světlušky. Samičky jsou bez křídel, podobné larvám. Žijí na zemi a vydávají intenzivní světlo. Samečci jsou okřídlení, během letu také vydávají světlo a z výšky vyhledávají samičky, aby se s nimi mohli spářit…*“. Dle mého

názoru je zde dobře vysvětleno, proč světlušky svítí, ale chybí zde minimálně pojem světélkování a vysvětlení, že se jedná o biochemickou reakci světlušky. Žák se sice dozvěděl, že světluška svítí a proč, ale neví, co to svícení je a jak ho pojmenovat. V žádné další části učebnice už není o světélkování zmínka.

8.2 Učebnice pro 7. ročník ZŠ a sekundu víceletých gymnázií

Pro účely analýzy textu z důvodu vyhledání informací o světélkování jsem prošla tyto učebnice: Přírodopis II pro 7. ročník ZŠ od Luďka Jindřicha Dobroruky a kol., nakladatel Scientia, Praha, z roku 2003, dále Přírodopis pro 7. ročník ZŠ od Eduarda Kočárka a kol., nakladatel Jinan, Úvaly, z roku 1998, Přírodopis 7 pro základní školy – Zoologie a botanika od Vladimíra Černíka a kol., nakladatel SPN, Praha, z roku 2008, Přírodopis 7 pro ZŠ a víceletá gymnázia od Ivany Pelikánové a kol., nakladatel Fraus, Plzeň, z roku 2015 a nakonec Přírodopis pro 7. ročník základní školy a primu víceletého gymnázia od Věry Čabradové a kol., nakladatel Fraus, Plzeň, z roku 2005, Přírodopis 7, 1. díl Strunatci, pro 1. pololetí 7. ročník základních škol a odpovídající ročníky víceletých gymnázií od Borise Rychnovského a kol., nakladatel NOVÁ ŠKOLA, s. r. o., Brno, z roku 2019. Žádná z uvedených učebnic ovšem ve svém textu nikde nezmiňuje pojem světélkování, bioluminiscence nebo neuvádí žádný bioluminiscenční druh. Toto zjištění mě překvapilo, protože se tyto učebnice věnují převážně strunatcům a téma bioluminiscence by se tak dalo využít při výuce např. hlubokomořských ryb jako jedna z ukázek adaptace.

9 Pracovní list s dotazníkem

Přes aplikaci Google Forms jsem vytvořila formulář pro žáky 2. stupně základních škol a nižší ročníky víceletých gymnázií. Ve formuláři je zahrnut krátký dotazník pro žáky s otázkami, zda se s pojmem bioluminiscence/světélkování již v životě setkali, pokud ano, tak kde, zda někdy viděli světlušku svítit ve volné přírodě. Výsledek dotazníku mě zajímal, protože sama jsem se před studiem na vysoké škole o světélkování organismů nezajímala, během předchozího vzdělávání jsem povědomí o tomto ději měla, ale s pojmem bioluminiscence jsem se poprvé setkala až při hodinách zoologie.

V další části formuláře je připravený pracovní list rozdělený na dva úkoly. Jako první úkol je pro žáky vloženo video s názvem The brilliance of bioluminescence od Leslie Kenna, 2013, z edukačního portálu TED-Ed. Video je v anglickém jazyce a české titulky nelze do videa bohužel přiložit. Byl tedy připraven překlad textu videa jako opora pro jeho zhlédnutí. Přiložené video jsem si vybrala z toho důvodu, že je v něm dle mého názoru toto téma dobře vysvětleno a animace pomohou žákovi se v této problematice lépe orientovat, přiblížit mu ji. Žák má za úkol se na video podívat a poté pokračovat do druhé části, kde jsou připravené otázky týkající se obsahu videa. Otázky jsou uzavřené i otevřené (pouze pro krátkou odpověď). Správné odpovědi jsem zaslala společně s žádostí o vyplnění listu. Video s otázkami (pracovní list) by se dalo použít jako vyučovací pomůcka při hodinách přírodopisu, ať už kdyby se probíralo přímo toto téma nebo jako doprovodná aktivita k jinému tématu, které se světélkování také dotýká, např. při probírání tématu blanokřídlého hmyzu, světlušek. Dalo by se využít jako způsob probrání nového učiva nebo k zafixování a opakování probraného.

Webový odkaz na formulář je zde: Dotazník použitý pro BP - Formuláře Google.

Formulář jsem rozeslala na 115 různých základních škol a 26 víceletých gymnázií. Zasílání probíhalo přes e-mail a žádala jsem po institucích, zda by mohly formulář sdílet se svými žáky či by mohli pedagogové vyučující přírodovědně zaměřené předměty na dané škole zaslat zpětnou vazbu. E-mailové adresy jsem našla na webových stránkách škol. Návratnost bohužel nebyla velká, zpětnou vazbu přes e-mail jsem bohužel žádnou neobdržela.

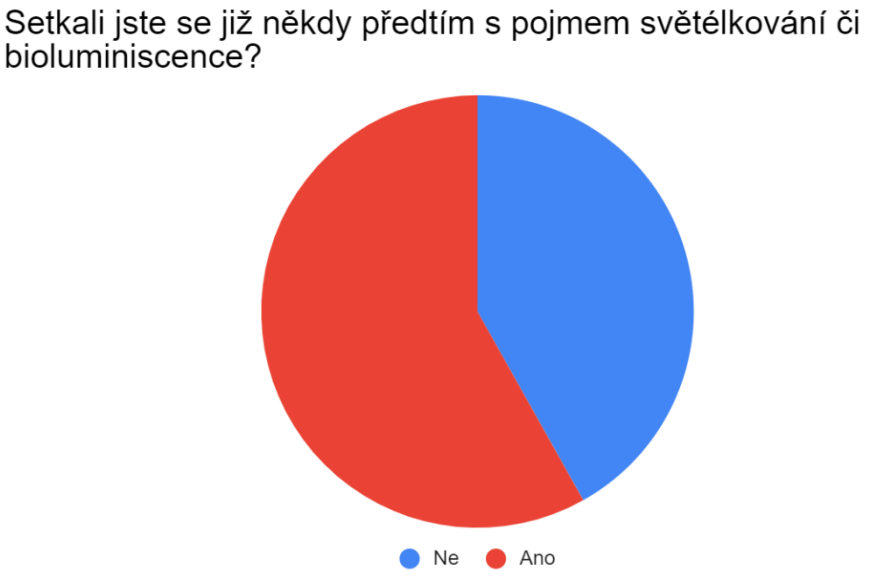
Celkem jsem zpět obdržela odpovědi od 44 respondentů.

Ze zaslaných odpovědí jsem získala tato data:

1) Vyplňte, prosím, jaký ročník navštěvujete.

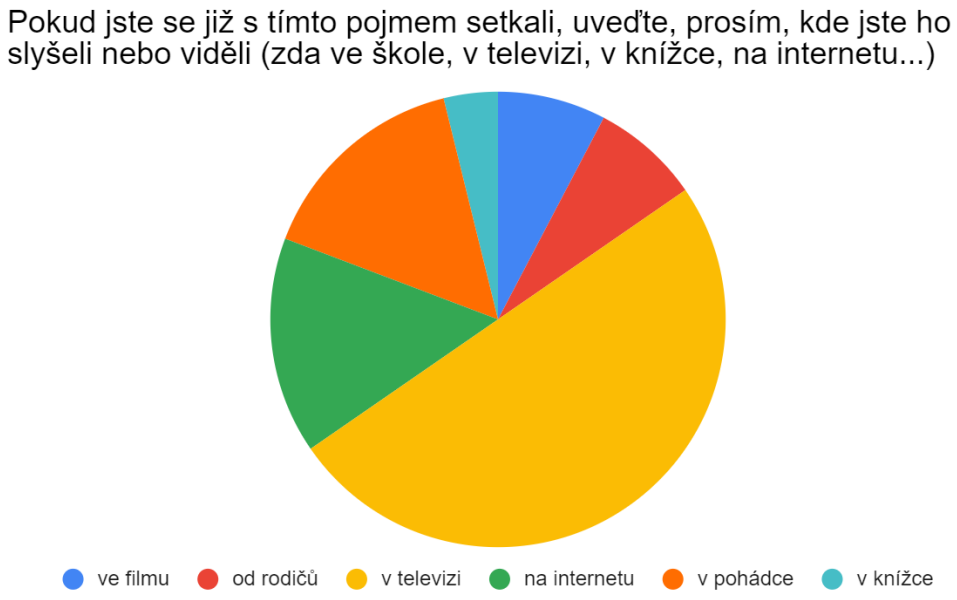
Graf 1- ročník (Michaela Ševicová, 2021)

2) Setkali jste se již někdy předtím s pojmem světélkování či bioluminiscence?



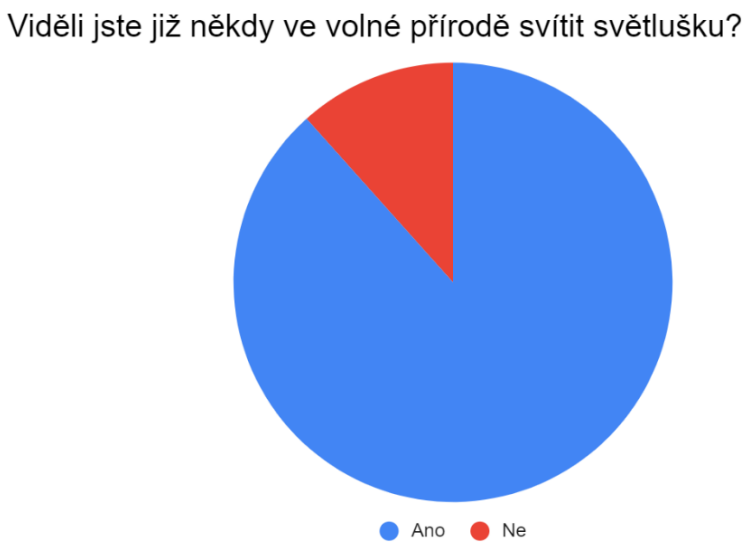
Graf 2- setkání s pojmem (Michaela Ševicová, 2021)

3) Pokud jste se již s tímto pojmem setkali, uveďte, prosím, kde jste ho slyšeli nebo viděli (zda ve škole, v televizi, v knížce, na internetu...)



Graf 3- otevřená otázka, kde se žák s pojmem setkal (Michaela Ševicová, 2021)

4) Viděli jste již někdy ve volné přírodě svítit světlušku?



Graf 4- světluška ve volné přírodě (Michaela Ševicová, 2021)

Z reakcí respondentů vyplývá následující:

1) Odpovídali pouze žáci 7. nebo 8. ročníků základních škol nebo žáci 2. a 3. ročníků nižších gymnázií.

2) Více než polovina žáků se již s pojmem světélkování/bioluminiscence dříve setkala, zbytek nikoliv. Překvapilo mě, že více než polovina dotazovaných světélkování zná, když vezmeme v potaz zjištěnou informaci, kolik prostoru je tomuto fenoménu věnováno v učebnicích.

3) Nejčastěji se respondenti s tímto pojmem setkali „v televizi/ve filmu“. Objevovaly se však i odpovědi jako „v pohádce, od rodičů, v knížce, na internetu“. Žádný žák neuvedl, že by se s tímto pojmem setkal ve škole.

4) Valná většina odpovědí potvrdila setkání se světluškou. Tuto odpověď jsem očekávala. Touto otázkou jsem chtěla žákovi napovědět spojitost mezi světélkováním a světluškou.

Zbytek získaných dat byly odpovědi žáků na mé otázky, které měli žáci zodpovědět po zhlédnutí videa. Žáci si s největší pravděpodobností video opravdu pustili a zhlédli jej, protože odpovědi byly ve valné většině správné.

Otázky k přiloženému videu:

1) Bioluminiscence, česky světélkování, je děj, ...

   a) který probíhá pouze u některých živých organismů.

   b) který probíhá v živé i neživé přírodě (např. probíhá i v horninách).

   c) který probíhá u všech živých organismů.

2) Bioluminiscence je biochemická reakce, při které nejčastěji dochází k...

   a) oxidaci luciferinu za přítomnosti enzymu luciferázy.

   b) přeměně melatoninu změnou teploty.

   c) aktivaci buněčných stěn cukry.

3) Při bioluminiscenční reakci se uvolňuje energie, která má podobu...

   a) světla, které je velmi horké a při dotyku bychom se o něj popálili.

   b) světla, na které lze sáhnout i rukou, protože je studené.

c) zvukové vlny.

4) Vyberte jednu z možností, která nepatří do věty: Bioluminiscence organismům může sloužit...

a) k přivábení partnerů k páření.

b) jako varovný signál pro predátory, že by si na nich strávník moc nepochutnal.

c) pro přilákání nic netušící kořisti.

d) jako signál, že daný organismus má přebytečnou energii.

e) k rychlému nepozorovanému útěku před predátory.

5) Některé organismy neumí samy ve svém těle světélkování vytvořit, používají k tomu proto...

a) bioluminiscenční houby.

b) bioluminiscenční řasy.

c) bioluminiscenční bakterie.

6) Bioluminiscence by se dala podle vědců možná v budoucnosti využít…

a) k osvětlování vozovek „svítícími“ stromy.

b) jako palivo pro lety raket do vesmíru.

c) jako levný a obnovitelný zdroj tepla.

7) Napište alespoň dva organismy z videa, které mají schopnost bioluminiscence... (jediná otevřená otázka)

Výukové video The brilliance of bioluminescence od Leslie Kenna, 2013, je dostupné na kanálu TED-Ed serveru YouTube: The brilliance of bioluminiscence - YouTube.

Vytvořený překlad obsahu videa, na které byly připraveny doprovodné otázky:

„Představte si místo tak temné, že si nevidíte ani na špičku nosu. Zavíráte a otevíráte oči. Pořád to samé. Sem totiž Slunce nikdy nesvítí. Vtom před sebou uvidíte světlo. Když se přiblížíte jej prozkoumat, poletuje kolem vás modravé světélko. „Na tohle se vydržím dívat navěky,“ pomyslíte si. Ale to nepůjde, protože před vámi se rozevírá tlama mořského ďasa, který vás

sežere zaživa. Právě jste se stali jedním z mnoha tvorů žijících na dně oceánu, kteří až příliš pozdě pochopili pravou sílu bioluminiscence.

Slovem bioluminiscence označujeme schopnost některých bytostí vytvářet světlo. Lidské tělo umí vytvořit různé věci, jako třeba ušní maz nebo nehty, ale tyto organismy umí přeměnit části svých těl na svítící tyčinky. Jako by je příroda chtěla vybavit na párty. Ptáte se proč?

Bioluminiscence má mnoho podob, ale jejím účelem je vždy zvýšení šance na přežití. Tak například světluška. Zelenkavé světlo jí za horkých letních nocí pomáhá přivábit partnera k páření. Ale nejde zdaleka o jediného tvora, který umí světélkovat. Larva druhu *Phrixothrix hirtus*, přezdívaná „železniční brouk“, dokáže tělo rozsvítit hned dvěma barvami: červeně a zeleně. Snědli byste snad něco, co připomíná přistávací dráhu? Rozumní predátoři taky ne. Díky světélkům je larva v bezpečí. Dále tu máme krevetu druhu *Acantherphyra purpurea*. Když se cítí ohrožena, vychrlí ze svých úst oblak svítící mazlavé tekutiny. Kdo by nebral roha, když ho někdo pozvrací? Světélkující skvrna navíc k útočníkovi přivábí větší predátory, kteří mají na nepřítele krevety zálusk.

Ale co když nemáte schopnost bioluminiscence? Žádný problém! Různí tvorové našli způsoby, jak využít bioluminiscenci ve svůj prospěch, i když se sami nenarodili se schopností světélkovat. Vraťme se na chvíli za ďasem v okamžiku, kdy se vás pokusil sníst. Ta svítící návnada, co má na hlavě? Je to kapsa kůže nazvaná *esca*. V esce jsou bioluminiscenční bakterie. Ďas neumí sám svítit, a proto ve své kapse udržuje svítící bakterie. Pamatujete na světlušku? Ta umí světélkovat sama od sebe. Uvnitř její lucerničky jsou dvě chemikálie, luciferin a luciferáza. Když se luciferáza a luciferin smíchají za přítomnosti kyslíku a buněčného paliva zvaného adenosintrifosfát (důležitý pro život buněk), následná reakce produkuje energii ve formě světla.

Jakmile vědci přišli na to, jak světluška vytváří luciferázu a luciferin, zkusili pomocí genetického inženýrství vytvořit stejnou světelnou reakci uvnitř organismů, které jinak světélkovat nedokážou. Například vložili do buňky tabáku geny sloužící jako instrukce, které měly naučit buňku vytvářet luciferázu a luciferin, stejně jako světluška. Jakmile byly geny v buňce, rostlina se řídila instrukcemi, které vklouzly do její deoxyribonukleové kyseliny (nositelka genetické informace), a rozsvítila se jako vánoční stromeček.

Krásou bioluminiscence je, že na rozdíl od světla ze Slunce nebo žárovky není vůbec horká. Probíhá za teplot, které nepálí živé bytosti. A na rozdíl od svítící tyčky, která pohasíná, když se chemikálie uvnitř spotřebují, bioluminiscenční reakce používají obnovitelné zdroje. To je jeden

z důvodů, proč se vědci pokouší vyvinout bioluminiscenční stromy. Jen si představte, kdyby takové stromy rostly podél dálnic. Mohly by osvětlovat cestu pouze za pomoci kyslíku a dalších všudypřítomných a obnovitelných zdrojů. To je teprve zvýšení šance na přežití! Naše planeta by díky tomu mohla žít déle.

Napadají vás další způsoby, jak využít bioluminiscenci pro dobrou věc? Svítící tyčinka vám možná pomůže přivábit partnera na párty, ale jak ještě může bioluminiscence zlepšit váš život? Pokud začnete přemýšlet tímto způsobem, tak uzříte světlo.“

Závěr

Předložená bakalářská práce shrnuje základní informace o světélkování u živých organismů (historie, přítomnost u organismů, využití ve vědě) a vyhodnocuje informace o tomto tématu uváděné ve vybraných učebnicích používaných na našich školách.

Bioluminiscence je pozoruhodný biochemický děj, který probíhá v těle některých organismů. Ačkoliv se zdá, že je tento děj v přírodě vzácný, opak je pravdou. Bioluminiscenční zástupce mají ve svých řadách skoro všechny říše. V práci je uvedeno několik desítek konkrétních příkladů organismů (bakterií, řas, hub, bezobratlých a obratlovců) schopných bioluminiscence s uvedením dílčích podrobností.

V didaktické části je zpracována analýza vybraných, často používaných učebnic přírodopisu pro 2. stupeň základních škol a nižších ročníků víceletých gymnázií. Bylo zjištěno, že o světélkování se v učebnicích autoři zmiňují minimálně, většinou pouze v souvislosti se světluškami (Lampyridae), a to bez podrobnějších informací. V provedeném dotazníkovém šetření, které mělo za cíl zjistit znalosti žáků o světélkování organismů, se prokázalo, že většina respondentů o tomto jevu věděla, nikoli ale na základě výuky ve škole. K doplnění výuky tohoto tématu ve škole byl připraven pracovní list a dále byla využita internetová prezentace tohoto tématu (vzhledem k tomu, že šlo o anglickou verzi, byl připraven český text použitelný při promítání videa). Z časových důvodů zatím nebylo možné vyhodnotit zpětnou vazbu žáků na zhlédnuté video.

Seznam použitých informačních zdrojů

BECKEROVÁ, Deborah. Svítící organismy: Jak to jen dělají? *Zprávy z MUNI* [online]. 2005, 2018 [cit. 2021-02-02]. ISSN 1801-0814. Dostupné z: https://www.em.muni.cz/vite/10150-svitici-organismy-jak-to-jen-delaji

BOCÁKOVÁ, Milada. Bioluminiscence u brouků a její evoluce. *Živa*. 2009, **57**(5), 226–227. ISSN 0044-4812.

DAVIS, Matthew P., John S. SPARKS a W. Leo SMITH, 2016. Repeated and Widespread Evolution of Bioluminescence in Marine Fishes. *PLOS One* [online]. **11**(6), 1-11 [cit. 2022-03-16]. Dostupné z: doi:10.1371/journal.pone.0155154

DEHEYN, Dimitri D. a Michael I. LATZ. Internal and secreted bioluminescence of the marine polychaete Odontosyllis phosphorea (Syllidae). *Invertebrate Biology*. 2009, **128**(1), 31–32. ISSN 1077-8306.

DVOŘÁČKOVÁ, Hana. *Jan Karafiát – Broučci* [online]. Brno, 2008 [cit. 2021-02-01]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/s6w71/diplomka2008.pdf. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Filozofická fakulta. Vedoucí práce Doc. PhDr. Vlastimil Válek, CSc.

HANLEY, Karen A. a Edith A. WIDDER, 2017. Bioluminescence in Dinoflagellates: Evidence that the Adaptive Value of Bioluminescence in Dinoflagellates is Concentration Dependent. Photochemistry and Photobiology [online]. **93**(2), 519-530 [cit. 2022-01-18]. ISSN 0031-8655. Dostupné z: doi:10.1111/php.12713

HAVLÍK, Pavel. *Luminiscence ve forenzních vědách a kriminalistice* [online]. Zlín, 2017 [cit. 2021-02-01]. Dostupné z: https://1url.cz/bz6aQ. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky. Vedoucí práce Doc. RNDr. Vojtěchovi Křesálkovi, CSc.

HEJDUKOVÁ, Martina. *Luminiscenční studie ledu* [online]. Brno, 2014 [cit. 2021-02-01]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/oort4/Bakalarska_prace_Hejdukova.pdf. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Mgr. Dominik Heger, PhDr.

KAFKA, Zdeněk a Jana PUNČOCHÁŘOVÁ. Biotesty a jejich aplikace v analytice životního prostředí. *Chemické listy*. 1999, **93**(10), 604–606. ISSN 0009-2770.

KRÖNSTRÖM, Jenny. *Control of bioluminescence: Operating the light switch in photophores from marine animals.* [online]. Göteborg, 2009 [cit. 2021-02-14]. Dostupné z:

https://gupea.ub.gu.se/bitstream/2077/19172/1/gupea_2077_19172_1.pdf. Disertace. University of Gothenburg.

LEE, John. Bioluminescence: The First 3000 Years (Review). Journal of Siberian Federal University: Biology. 2008, **1**(3), 194–205. ISSN 1997-1389.

MCKEE, David A. Titul: Fire in the Sea: Bioluminescence and Henry Compton's Art of the Deep. College Station: Texas A&M University Press, 2014. ISBN 9781623490317.

MICALIZIO, Caryl-Sue, EVERS, Jeannie, ed. Bioluminescence. *National Geographic* [online]. 1996, 2013 [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/bioluminescence/

MÍKA, Luděk a Pavel TEPLÝ. Od světlušek ke svítícím tyčinkám. *Přírodovědci.cz*. 2015, **4**(1), s. 8. ISSN 1805-5591.

MOČUBOVÁ, Dominika. *Bioluminiscenční organismy* [online]. Brno, 2006 [cit. 2021-02-06]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/e4mva/Bioluminiscencni_organismy.pdf. Bakalářská práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce RNDr. Pavel Hyršl, Ph.D.

MOČUBOVÁ, Dominika. *Význam a využití bakteriální bioluminiscence* [online]. Brno, 2008 [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/cvsa0/DP_jlxhhttw.pdf. Diplomová práce. Masarykova univerzita, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce RNDr. Pavel Hyršl, Ph.D.

NOAA. What is marine snow? *National Ocean Service* [online]. National Oceanic and Atmospheric Administration, 11.05.2020 [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: https://oceanservice.noaa.gov/facts/marinesnow.html

OBA, Yuichi a Darrin T. SCHULTZ. Eco-Evo Bioluminescence on Land and in the Sea. THOUAND, Gérald a Robert MARKS, ed. *Bioluminescence: Fundamentals and Applications in Biotechnology*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014, 4–25. ISBN 978-3-662-43384-3.

PAITIO, José, Yuichi OBA a Victor Benno MEYER-ROCHOW. Bioluminescent Fishes and their Eyes. THIRUMALAI, Jagannathan, ed. Luminescence - AnOutlook on the Phenomena and their Applications. United Kingdom: IntechOpen, 2016, s. 297–311. ISBN 978-953-51-2763-5.

POKORNÝ, Jan. *Luminiscence ve středoškolské laboratoři* [online]. Olomouc, 2015 [cit. 2021-02-01]. Dostupné z: https://1url.cz/ez6a1. Diplomová práce. Univerzita Palackého v Olomouci, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Mgr. František Látal, Ph.D.

POLÁKOVÁ, Kateřina. Biologové popsali, jak světlušky dokáží koordinovaně blikat. Vytváří obří síť vzruchů. ČT24 [online]. 2021 [cit. 2021-9-3]. Dostupné z: https://ct24.ceskatelevize.cz/veda/3339696-biologove-popsali-jak-svetlusky-dokazi-koordinovane-blikat-vytvari-obri-sit-vzruchu

ROGERS, Kara. Noctiluca: dinoflagellate genus. *Encyclopedia Britannica* [online]. 2017 [cit. 2021-02-22]. Dostupné z: https://www.britannica.com/science/Noctiluca

SHIMOMURA, Osamu a Ilia YAMPOLSKY. *Bioluminescence : chemical principles and methods*. Revised edition. New Jersey: World Scientific, 2012. ISBN 978-981-4366-08-3.

SOCHOR, Michal a Zuzana EGERTOVÁ. Bioluminiscence hub – odvěký a stále záhadný fenomén. *Živa*. 2015, **63**(6), 282-284. ISSN 0044-4812.

ŠÍPEK, Petr. Nesvítí jen světlušky – bioluminiscence v říši hmyzu. *Přírodovědci.cz* [online]. 2013 [cit. 2021-02-02]. Dostupné z: https://www.prirodovedci.cz/biolog/clanky/nesviti-jen-svetlusky-bioluminiscence-v-risi-hmyzu

ŠKORPÍK, Martin. Když se řekne světluška. Veronica. 2014, **28**(1), 13-14. ISSN 1213-0699.

TURKOGLU, Muhammet. Red tides of the dinoflagellate Noctiluca scintillans associated with eutrophication in the Sea of Marmara (the Dardanelles, Turkey). *ScienceDirect* [online]. 2013, **55**(3), 710 [cit. 2021-03-19]. ISSN 0078-3234. Dostupné z: doi: 10.5697/oc.55-3.709

VALIADI, Martha a Debora IGLESIAS-RODRIGUEZ. Understanding Bioluminescence in Dinoflagellates—How Far Have We Come? *Microorganisms* [online]. 2013, **1**(1), 4–13 [cit. 2021-02-17]. ISSN 2076-2607. Dostupné z: doi: 10.3390/microorganisms1010003

WATKINS, Oliver C., Miriam L. SHARPE, Nigel B. PERRY a Kurt L. KRAUSE. New Zealand glowworm (Arachnocampa luminosa) bioluminescence is produced by a frefy-like luciferase but an entirely new luciferin. Scientific reports [online]. Nature Research, 2018, 8(3278), 1–2 [cit. 2021-9-13]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: https://www.nature.com/articles/s41598-018-21298-w

WIDDER, Edith. Bioluminescence in the Ocean: Origins of Biological, Chemical, and Ecological Diversity. *Science* 2010, **328**(5979), 704–708. ISSN 1095-9203.

WIDDER, Edith A. a Beth FALLS. Review of Bioluminescence for Engineers and Scientists in Biophotonics. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* [online]. 2014,

March 2014, **20**(2), 3–5 [cit. 2021-02-16]. ISSN 1558-4542. Dostupné z: doi: 10.1109/JSTQE.2013.2284434

WILSON, Thérèse a J. Woodland HASTINGS. Bioluminescence: Living Lights, Lights for Living. 3. vydání. Cambridge, Mass: Harvard University Press, 2013. ISBN 9780674067165.

ŽIŽKOVÁ, Klára. Automatizace toxikologických testů [online]. Hradec Králové, 2018 [cit. 2021-02-03]. Dostupné z: https://dspace.cuni.cz/bitstream/handle/20.500.11956/104253/150043141.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. Univerzita Karlova, Farmaceutická fakulta v Hradci Králové. Vedoucí práce Doc. PharmDr. Hana Sklenářová, Ph.D.

Seznam obrázků, videí a tabulek

Bioluminescence: ‘sea sparkles’ light Tassie waters. Australian Geographic [online]. Hornsby, Australia, 2015 [cit. 2021-8-31]. Dostupné z: https://www.australiangeographic.com.au/topics/science-environment/2015/05/bioluminescence-sea-sparkles-light-tassie-waters/ (obrázek č. 2)

KREJČÍK, S. Bioluminiscence u brouků a její evoluce. Živa [online]. Nakladatelství Academia, 2009 [cit. 2021-8-31]. Dostupné z: https://ziva.avcr.cz/2009-5/bioluminiscence-u-brouku-a-jeji-evoluce.html (obrázek č. 6)

PROFIMEDIA.CZ. Světlo v temnotách: Zvířata si na vás posvítí. Abc [online]. 2017 [cit. 2021-8-31]. Dostupné z: https://www.abicko.cz/clanek/precti-si-priroda/21722/svetlo-v-temnotach-zvirata-si-na-vas-posviti.html (obrázek č. 4 a 7)

SOCHOR, Michal a Zuzana EGERTOVÁ. Bioluminiscence hub – odvěký a stále záhadný fenomén. Živa [online]. 2015 [cit. 2021-8-31]. Dostupné z: https://ziva.avcr.cz/2015-6/bioluminiscence-hub-odveky-a-stale-zahadny-fenomen.html (obrázek č. 3)

TED-Ed, 2013, The brilliance of bioluminescence - Leslie Kenna, YouTube video. [20.9.2021]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=oKjFVBVGad0&t=134s. (video z odkazu formuláře)

VALIADI, Martha a Debora IGLESIAS-RODRIGUEZ. Understanding Bioluminescence in Dinoflagellates—How Far Have We Come? Microorganisms [online]. Basel, Switzerland: MDPI, 2013 [cit. 2021-8-31]. Dostupné z: https://www.mdpi.com/2076-2607/1/1/3 (tabulka č. 1)

WILSON, Thérèse a J. Woodland HASTINGS. Bioluminescence: Living Lights, Lights for Living. 3. vydání. Cambridge, Mass: Harvard University Press, 2013. ISBN 9780674067165. (obrázek č. 5)

YOULE, Merry. The Two Faces of Photorhabdus. Small Things Considered [online]. American Society For Microbiology, 2009 [cit. 2021-8-31]. Dostupné z: https://schaechter.asmblog.org/schaechter/2009/03/the-two-faces-of-photorhabdus.html (obrázek č. 1)