

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Odjel za biologiju

Preddiplomski studij biologije

Dunja Šimić

Bioluminescencija kod životinja

Završni rad

Osijek, 2018.

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
Odjel za biologiju
Preddiplomski sveučilišni studij Biologija
Znanstveno područje: Prirodne znanosti
Znanstveno polje: Biologija

Bioluminescencija kod životinja

Dunja Šimić

Rad je izrađen na: Odjelu za biologiju, Zavod za zoologiju

Mentor: doc. dr. sc. Goran Vignjević

Kratki sažetak završnog rada: Bioluminescencija predstavlja produkciju i emitaciju svjetlosti od strane živog organizma, kao rezultat kemijske reakcije tijekom koje se kemijska energija pretvara u svjetlosnu. Životinje koje posjeduju ovu sposobnost nazvane su svjetlećim ili luminescentnim životinjama te pripadaju različitim životinjskim skupinama. U njih ubrajamo: praživotinje, spužve, žarnjake, rebraše, vrpčare, mekušce, kolutičavce, rakove, stonoge, kukce, bodljikaše, žiroglavce, plaštenjake i ribe. Ova sposobnost ima vrlo zanimljivu evoluciju unutar različitih skupina organizama te već dugi niz godina pomaže životinjskim organizmima u raznim aspektima njihova života kao što su zaštita od neprijatelja, privlačenje suprotnog spola i drugo, te je odigrala i bitnu ulogu u mnogim znanstvenim istraživanjima.

Jezik izvornika: hrvatski

Ključne riječi: luciferin, evolucija, uloge bioluminescencije

Rad je pohranjen: na mrežnim stranicama Odjela za biologiju te u Nacionalnom repozitoriju završnih i diplomskih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice u Zagrebu.

BASIC DOCUMENTATION CARD

BACHELOR THESIS

Josip Juraj Strossmayer University of Osijek
Department of Biology
Undergraduate university study programme in Biology
Scientific area: Natural sciences
Scientific field: Biology

Bioluminescence in animals

Dunja Šimić

Thesis performed at: Department of Biology, Subdepartment of Zoology

Supervisor: Goran Vignjević, PhD, Assistant Professor

Short abstract: Bioluminescence is the production and emission of light by a living organism as a result of a chemical reaction during which the chemical energy turns into light. Animals possessing this ability are called luminous or luminescent animals and belong to different animal groups such as: protozoans, sponges, cnidaria, ctenophora, nemertea, mollusca, annelida, crustacea, myriapoda, insects, echinodermata, enteropneusta, tunicata and fish. This ability has a very interesting evolution within different groups of organisms and for many years, it has been helping animal organisms in various aspects of their life such as protection from the enemy, the attraction of the opposite sex and others, and has also played an important role in numerous scientific researches.

Original in: Croatian

Key words: luciferin, evolution, roles

Thesis deposited: on the Department of Biology website and the Croatian Digital Theses Repository of the National and University Library in Zagreb.

SADRŽAJ

1. UVOD

2. OSNOVNI DIO

2.1. Podjela luciferina

2.2. Evolucija bioluminescencije

2.2.1. Prva pojava i uloge bioluminescencije na primjeru krijesnica (*Lampyridae*)

2.2.2. Evolucija visceralne bioluminescencije u porodici *Apogonidae*

2.2.3. Evolucija bioluminescencije u dubokomorskih škampa *Oplophoridae*

2.3. Uloge bioluminescencije

2.3.1. Zaštita od neprijatelja

2.3.2. Hranjenje

2.3.3. Privlačenje suprotnoga spola

2.4. Bioluminescencija i ljudi

2.4.1. Bioluminescencija i znanost

2.4.2. Bioluminescencija i umjetnost

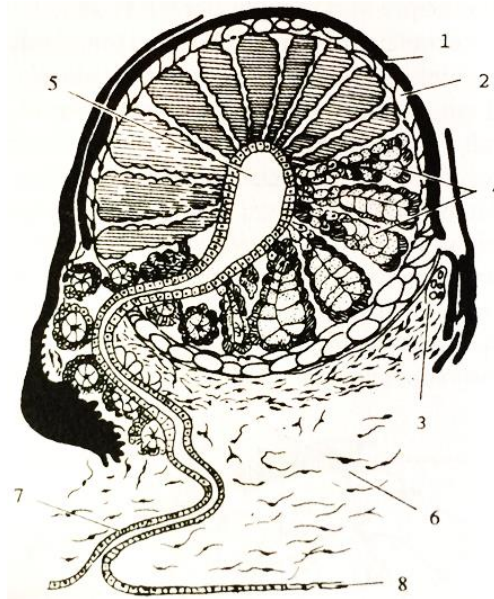
3. ZAKLJUČAK

4. LITERATURA

1. UVOD

U životinjskome svijetu postoje razne vrste čiji dijelovi tijela imaju sposobnost emitiranja svjetlosti. Takvih vrsta je ponajviše u dubokom moru, a puno manje na kopnu i u kopnenim vodama. Sposobnost emitiranja svjetlosti poznatija je pod nazivom bioluminescencija (Matoničkin i sur., 2010). Bioluminescencija predstavlja produkciju i već spomenutu emisiju svjetlosti od strane živog organizma, kao rezultat kemijske reakcije tijekom koje se kemijska energija pretvara u svjetlosnu (Web 1). Smatra se hladnom svjetlošću jer 80-92% energije pretvori se u svjetlost, a samo neznatan dio energije (8-20%) gubi se u obliku topline. Hladno svjetlo životinje postižu zahvaljujući činjenici da njihovo svjetlo nije sastavljeno od čitavoga vidljivoga spektra, već samo od njegova dijela. Njihov spektar svjetla što ga proizvode suprotan je Sunčevu svjetlu te je skraćen na oba kraja. Životinje koje posjeduju ovu sposobnost nazvane su svjetlećim ili luminescentnim životinjama te pripadaju različitim životinjskim skupinama. U njih ubrajamo: praživotinje, spužve, žarnjake, rebraše, vrpčare, mekušce, kolutićavce, rakove, stonoge, kukce, bodljikaše, žiroglavce, plaštenjake i ribe.

Životinjske vrste koje posjeduju ovu sposobnost podijeljene su u dvije skupine: prave svjetleće životinje i sekundarno svjetleće životinje. Pravim svjetlećim životinjama pripadaju one koje posjeduju vlastite svjetleće organe (svjetlila ili fotofore), kao i one koje žive u trajnoj simbiozi sa svjetlećim bakterijama (Slika 1.). Svjetlila se mogu nalaziti na različitim dijelovima tijela. Primjerice, kod riba mogu se nalaziti u blizini očiju, duž bočne pruge, na glavi ili oko područja brčića. Kod praživotinja pronađeni su na površini čitavog tijela, u rebraša na rebrastim izbočenjima, kod zvjezdaca i zmijača pronađeni su na krakovima životinje. Kod kukaca se mogu nalaziti na različitim dijelovima kao što su leđna, trbušna te stražnja strana tijela. Ovi organi se u nekih životinja prvenstveno upotrebljavaju za raspoznavanje i pronalaženje spolova, dok kod drugih služe za pronalaženje plijena, dezorijentaciju neprijatelja, zaštitu i dr. Svjetlila su često povezana s organima kao što su leće i reflektori koji služe kao pomoćni organi, pojačivači svjetlosti.



Slika 1. Svjetlilo (fotofor) dubokomorske ribe: 1- pigmentni ovoj, 2- sloj za odražavanje (reflektor), 3- krvna žilica, 4- žljezdane stanice, 5- unutrašnja šupljina svjetlila, 6- želatinsta tvar, 7- vanjska cjevčica svjetlila, 8- epitelni sloj (Matoničkin i sur., 2010.)

Nadalje, postoje mnoge životinje koje ne posjeduju svjetlila te svijetle jedino kada ih napadnu, odnosno nasele luminescentne bakterije ili gljive. One pripadaju skupini sekundarno svjetlećih životinja. Svjetleće bakterije i gljive mogu živjeti na površini ili unutar životinje. Takva životinja smatra se inficiranom te prije ili kasnije ugiba, pa se može reći da su sekundarno svjetleće životinje bolesne životinje. Takve svjetlosne infekcije opisane su šturaka, komaraca, gusjenica, leptira, različitih rakova i drugih organizama. Još jedna razlika između ove dvije skupine životinja jest u tome što sekundarno svjetleće životinje svijetle u prisutnosti kisika, dok u pravih svjetlećih životinja to nije slučaj. One svijetle samo u slučajevima kada reagiraju na neki vanjski ili unutrašnji podražaj stoga se postavlja pitanje koje su fiziološke i kemijske osnove bioluminescencije u ovakvih životinja?

U najvećem broju slučajeva produkcija svjetlosti posljedica je djelovanja enzima. Široka i nepravilna rasprostranjenost enzimskih mehanizama za produkciju svjetlosti dokaz je da se bioluminescencija u životinjskome svijetu pojavljivala neovisno u različitim evolucijskim pravcima. Ova sposobnost proizvodnje i emitacije svjetlosti biva najviše ispitivana u krijesnica (*Lampyridae*). Dokazano je *in vitro* da je za bioluminescenciju kod krijesnica, kao i kod većine ostalih luminescentnih životinjskih organizama, bitna prisutnost luciferina (LH_2), enzima luciferaze, kisika, magnezija te adenzin- trifosfata (ATP). Zadaća enzima luciferaze je kataliziranje pretvorbe (oksidacije) luciferina u luciferil adenilat. Zatim, uz prisutnost kisika, luciferil adenilat prelazi u oksiluciferil, pri čemu se emitira svjetlost. O količini adenzin- trifosfata ovisi jačina emitirane svjetlosti kod životinje. Proizvodnja

luciferina i enzima luciferaze moguća je samo unutar žive stanice. No, za pretvaranje luciferina u drugi spoj, tzv. peroksilatonski međuproizvod, nije potrebna živa stanica jer je to kemijski proces koji se odvija neovisno o njoj. Dakle, iz navedenoga se može zaključiti da je životinjski organizam u mogućnosti svijetliti određeno vrijeme i nakon što nastupi smrt. Svjetlost, koja se primarno proizvodi unutar životinjina tijela, može se proizvoditi i izvan njega. Mnoge morske životinje kao što su zrakashi

(*Radiolaria*) i glavonošci (*Cephalopoda*) ispuštaju luciferin i luciferazu u okolnu vodu te se tada oksidacija odvija pomoću kisika otopljenog u vodi. Svjetleće tvari koje životinje puste u okolnu vodu ne mogu se ponovno iskoristiti za razliku od upotrijebljenih svjetlećih tvari koje se nalaze u živoj stanici organizma. One se mogu regenerirati te ih takve životinja ima mogućnosti ponovno iskoristiti. Točnije, životinje imaju sposobnost ponovne pretvorbe peroksilaktonskog međuproizvoda u luciferin. Zahvaljujući tome, luciferin se može iskoristiti više puta i ne mora se nužno proizvoditi novi. Osim prirodno prisutnog luciferina u tijelu životinje, danas ga je moguće i umjetno sintetizirati. Iniciranje luciferina i luciferaze u stanice drugih organizama koji ih prirodno ne posjeduju, dovodi do njihova svijetljenja te se ova metoda danas uvelike koristi u medicini, u ispitivanju onečišćenosti voda, tla, zraka i drugo.

Ono na što je posebno zanimljivo obratiti pažnju, jesu dva područja slična po količini prisutne svjetlosti u njima. To su dubokomorska područja i špilje. I u jednom i u drugom okruženju vlada potpuna tama, no razvoj bioluminescencije doveo je do promjena unutar njih. Primjerice, pojava bioluminescencije u dubokomorskih riba radi pronalaženja suprotnog spola, zaslužna je za jak razvoj njihovih očiju kojima bi mogle pratiti svjetlost. Nadalje, pojava bioluminescencije kao što je slučaj u nekim špiljama na Novom Zelandu, zaslužna je za razvoj očiju pauka potrebnih za opažanje svjetla i hvatanje potencijalnog plijena (Matoničkin i sur., 2010).

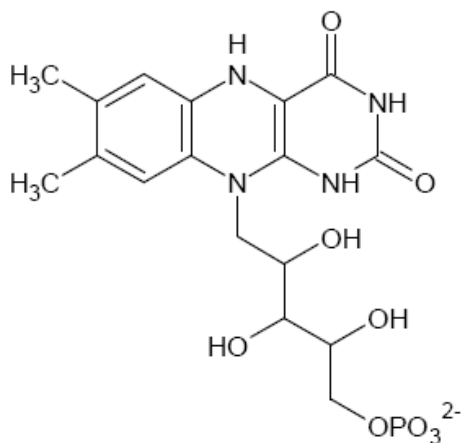
Zahvaljujući mnogim primjerima kao što su ovi, da se zaključiti da bioluminescencija ima vrlo veliku ulogu u životima raznih životinjskih skupina te je iz tog razloga cilj ovoga rada pobliže objasniti kako ona uopće nastaje, koje su njene bitne uloge u životinjskom svijetu te kako osim životinjama, može uvelike pomoći i nama, ljudima.

2. OSNOVNI DIO

2.1. Podjela luciferina

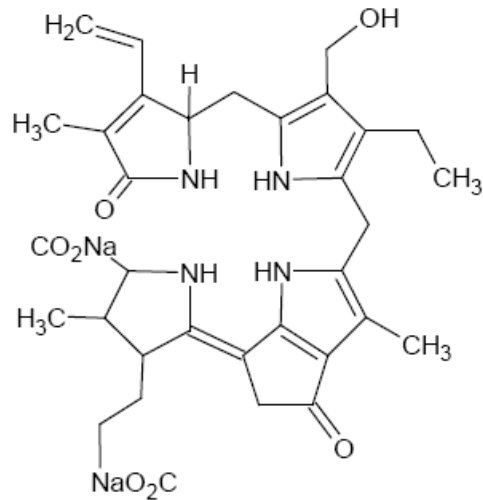
Već spomenuti luciferin koji je zaslužan za sposobnost bioluminescencije kod životinja, podijeljen je u 6 glavnih skupina, a to su: bakterijski luciferin, luciferin u svjetlećih bičaća, luciferin u gljiva, latia luciferin, vargulin, koelenterazin i luciferin pronađen u krijesnica. Zadaća im je ista, a međusobno se razlikuju po strukturi.

Bakterijski luciferin čini reducirani riboflavin-5'- fosfat (FMNH₂). Osim u bakterija, pronađen je i u simbiontima unutar istih (Slika 2.). (Web 2)



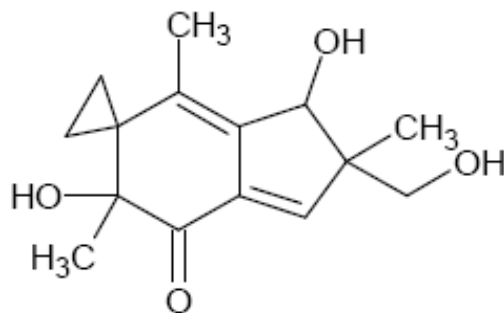
Slika 2. Struktura bakterijskog luciferina (Web 2)

Drugu skupinu čini luciferin pronađen u svjetlećih bičaća te malih morskih rakova nalik škampima koji predstavljaju njihove predatore (Slika 3.). (Web 2)

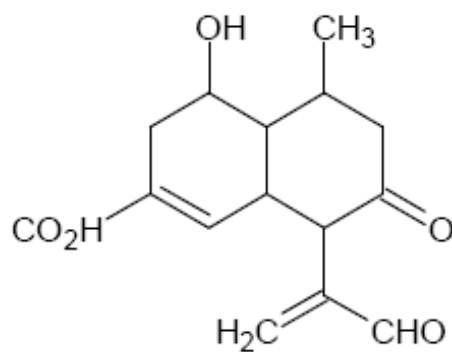


Slika 3. Struktura luciferina svjetlećih bičaša (Web 2)

Biokemija bioluminescencije gljiva trenutno je slabo poznata. Pretpostavlja se da su iludini, obitelj seskviterpena koji imaju antitumorska svojstva (lampteroflavin, derivat FMN) te panal, sesquiterpenski prekursor, zaslužni za emitaciju zelenkastog sjaja kod mnogih vrsta gljiva (Slika 4. i 5.). Nažalost, neke od ovih kemikalija nevjerovatno su otrovne u svom prirodnom obliku. (Web 2)

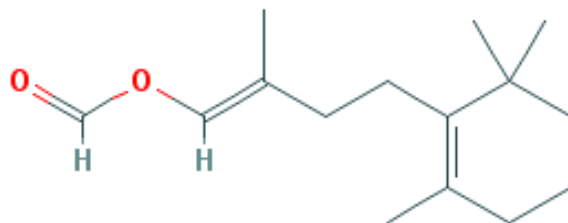


Slika 4. Struktura iludina S (Web 2)



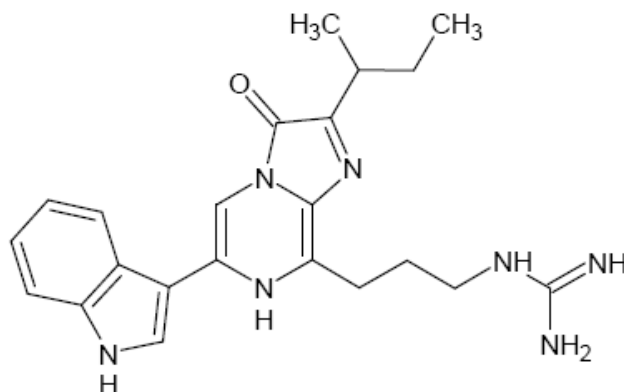
Slika 5. Struktura panala (Web 2)

Četvrtu skupinu luciferina zauzima takozvani Latia luciferin koji je pronađen kod slatkovodne vrste puža *Latia neritoides* (Slika 6.). (Web 3)



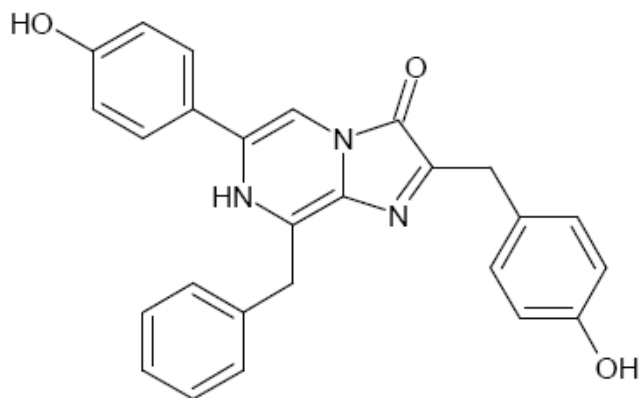
Slika 6. Struktura Latia luciferina (Web 4)

Petu skupinu luciferina čini takozvani vargulin, pronađen u ljuskarima (*Ostracods*) te mnogim vrstama ribama koje se njima hrane (Slika 7.). (Web 2)



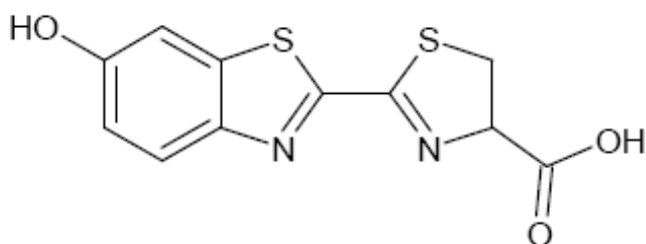
Slika 7. Struktura vargulina (Web 2)

Šestu skupinu čini takozvani koelenterazin koji se nalazi u mnogim životinjskim organizmima kao što su: radiolarije, rebraši, žarnjaci, lignje, veslonošci, deseteronošci, ribe i četinočeljusti (Slika 8.). (Web 2)



Slika 8. Struktura koelenterazina (Web 2)

Posljednja skupina obuhvaća luciferin pronađen u krijesnica. Ovaj spoj zahtijeva ATP kao kofaktor i stoga se može koristiti kao indikator stanične aktivnosti (Slika 9.). (Web 2)



Slika 9. Struktura luciferina u krijesnica (Web 2)

2.2. Evolucija bioluminescencije

2.2.1. Prva pojava i uloge bioluminescencije na primjeru krijesnica (*Lampyridae*)

Krijesnice su jedne od najzanimljivijih organizama na planeti te imaju vrlo bogatu povijest kao predmeti raznih znanstvenih istraživanja, najviše vezanih uz njihovo bioluminescentno ponašanje. Bioluminescencija je sustav signala među životinjama koji se koristi i kao aposematički i signal za privlačenje suprotnoga spola. Krijesnice su najraširenija skupina kopnenih organizama s ovom sposobnošću.

Sve poznate ličinke krijesnica su bioluminescentne. Emitiranje svjetlosti koriste po potrebi kao aposematički signal. Krijesnice sadrže obrambene steroide poznati kao lucibufagini i grabežljivci mogu naučiti povezati pojavu sjaja s lucibufaginima. Pretpostavlja se da bioluminescencija ličinke koja se koristi u aposematičkom kontekstu, predstavlja prvu funkciju i najraniji izvor bioluminescencije u krijesnica.

Lampyridae (krijesnice) je kozmopolitska porodica koja se sastoji od sedam podporodica, 67 rodova i oko 2000 vrsta. Vrste nekih rodova morfološki su identične i mogu se identificirati samo s poznavanjem specifičnih bioluminiscentnih bljeskovitih uzoraka koje emitiraju odrasli tijekom udvaranja. Druge vrste često posjeduju takve jedinstvene kombinacije morfoloških znakova te ih je iz tog razloga jako teško svrstati u odgovarajuću taksonomsku kategoriju. Upravo se filogenija koristi za rješavanje dva glavna cilja: (1) rekonstruirati stanja predaka i istražiti evolucijski uzorak bioluminescencije odraslih; (2) procijeniti koliko je puta bioluminescencija kod odraslih dobivena i izgubljena kroz evoluciju ove porodice.

Stanje bioluminescencije kod odraslih predaka rekonstruirano je pomoću Bayesian i „*Maximal Likelihood*“ topologije (obje izvedene iz cijelih skupova podataka). Bioluminescencija je kodirana kako slijedi: 0 = nema bioluminescencije (samo u odraslih); 1 = prisutna bioluminescencija (muški i / ili ženski, samo u odraslih). Primjerak je bio kodiran kao bioluminiscentan ako je imao svjetleći organ kao odrasla jedinka. Podaci o prisutnosti ili odsutnosti bioluminescencije i svjetlećih organa dobiveni su iz literature i izravnim promatranjem uzoraka.

Rezultati istraživanja Martina i sur. (2016) dokazali su da je prva pojava bioluminescencije u odraslih *Lampyridae* uočena unutar *Pterotusa* gdje je najviše služila kao aposematički signal, te nešto manje kao signal za privlačenje suprotnoga spola. Bioluminescencija je tek

kasnije postala glavni način seksualne komunikacije u *Luciolinae*, *Photurinae* i *Lampyrinae*, gdje je uz to, vjerojatno pridonijela i brzom diversifikaciji ovih svojti.

Nadalje, zaključeno je da je bioluminescencija kod odraslih jedinki nastala od jednog do šest puta te je kasnije pet do deset puta nestajala tijekom evolucije ove porodice bez obzira na metode rekonstrukcije stanja predaka korištene pri ovom istraživanju. (Martin, Branham, Whiting, Bybee, 2016.).

2.2.2. Evolucija visceralne bioluminescencije u porodici *Apogonidae*

Porodicu *Apogonidae* čine male raznovrsne ribe koje najčešće obitavaju u blizini grebena. U ovom istraživanju Thackera i Rojea (2009) ispituje se evolucija visceralnog bioluminescentnog sustava. Proučavanje fine strukture visceralnog bioluminescentnog sustava pomoću histologije pokazuje da svjetlosni organi pokazuju niz različitih morfologija, od kojih se neki sastoje od složenih tubula (*Siphamia*, *Pempheris*, *Parapriacanthus*) i drugih koji nemaju tubule, ali sadrže komoru formiranu od nabranog visceralnog epitela (*Acropoma*, *Archamia*, *Jaydia*, *Rhabdamia*). Svjetleći organi kod *Siphamia*, *Acropoma*, *Pempheris* i *Parapriacanthus* su povezani s crijevima, dok oni u *Archamia*, *Jaydia* i *Rhabdamia* su samo dijelovi crijevnog trakta te se malo razlikuju od okolnih tkiva. Prisutnost ili odsutnost simbiotskih luminescentnih bakterija nije u korelaciji sa strukturom svjetlosnog organa: cjevasti svjetlosni organi kod *Siphamia* i komorne cijevi *Acropoma* sadrže bakterija, dok oni u *Pempheridae* i drugih *Apogonidae* ne. Organi koji emitiraju svjetlost sa ili bez simbioznih bakterija, popraćeni su pomoćnim prilagodbama kao što su prozirne mrlje na koži kroz koje se svjetlost emitira. Najbolje proučeni svjetleći visceralni organi koji posjeduju simbiotske bakterije su oni iz već spomenutog roda *Siphamia* (Slika 10.). Površina organa je bijele boje s ventralne i crne s dorzalne strane te sadržava male šupljine unutar kojeg su bakterije. Iznad tih šupljina nalazi se prozirna membrana kroz koju prolazi svjetlost koju bakterije emitiraju u okolinu.

Prema istraživanju Thackera i Rojea (2009) zaključeno je da se svaki primjer visceralne luminescencije u *Apogonidae* razvio samostalno. Visceralni luminescentni sustavi su značajni zbog njihove raznolikosti i činjenice da su kroz geološku prošlost i sadašnjost drukčije eksprimirani unutar srodnih svojti. (Thacker, Roje, 2009.).



Slika 10. *Siphamia cephalotes* (Web 13)

2.2.3. Evolucija bioluminescencije u dubokomorskih škampa *Oplophoridae*

Velika većina bioluminescentnih svojti pronađena je široko rasprostranjena kroz Zemljine oceane. Pretežnost organizama koji proizvode svjetlost u moru ukazuje na važnost bioluminescencije na ponašanje, interakcije grabežljivac-plijen te komunikacije među jedinkama. (Haddock i sur. 2010)

Dubokomorski škampi iz porodice *Oplophoridae* posjeduju izvanredan mehanizam bioluminescencije u obliku plavog luminescentnog svjetla koji vjerojatno potječe iz hepatopankreasa i izlučuje se iz usta. Ova luminescentna sekrecija se pretpostavlja da je obrambeni mehanizam koji se koristi kao sredstvo zaprepaštenja ili ometanja potencijalnih predatora. Osim sekretorne luminescencije, tri roda posjeduju drugi mehanizam bioluminiscencije u obliku kutikularnih fotofora tj. svjetlećih organa.

Metoda rekonstrukcije stanja predaka („*Ancestral state reconstruction*“) korištena je u istraživanju Wonga i sur. (2014) za praćenje bioluminescencijskih obilježja unutar Bayesove topologije *Oplophoridae*. Ova metoda koristi statističke pristupe za ispitivanje evolucije. Istraživanje je usredotočeno na jedno svojstvo bioluminescencije koji je definiran na jedan od tri načina za svaku vrstu: nema bioluminescencije (0), sekretornu bioluminescenciju (1) ili sekretornu luminescenciju i luminescenciju fotofora (2). Wong i sur. (2014) koristili su obje metode; maksimalne vjerojatnosti i maksimalne metode parsimonije i usporedili dobivene rekonstrukcije. Dok maksimalna parsimonija ima za cilj objasniti evoluciju

pomoću najmanjih mogućih promjena karaktera tijekom vremena, rekonstrukcije maksimalne vjerojatnosti uzimaju u obzir sve moguće rekonstrukcije čimbenika evolucije. Istraživanja Wonga i sur. (2014) pomoću metode rekonstrukcije stanja predaka podržava jedno podrijetlo sekretorne luminescencije kod porodice *Oplophoridae*. Pokazalo se da se ovaj obrambeni mehanizam razvio zbog predatorskih pritisaka unutar svjetlosno ograničenih okruženja u kojima boravi ova porodica. Iako su mogle vrste snažni vertikalni migratori i rutinski odlaze u pliće dijelove vode noću, sve vrste iz ove porodice danju borave na dubini ispod 200m što ih čini mezopelagijalnim i ili batipelagijalnim organizmima. Analiza Wonga i sur. (2014) podržava činjenicu da se pojava fotofora (svjetlećih organa) dogodila kasnije u evoluciji *Oplophoridae*.

Svjetlost fotofora mogla se razviti u vrstama koje imaju tendenciju nastanjivanja plićih voda, gdje bi svjetlost koja je dolazila iz površine bila više istaknuta u stupcu vode i gdje bi ju upotrijebili u svrhu kamufliranja protiv potencijalnih predatora. Uočeno je da vrste koje žive u plićim dijelovima kao što je *S.debilis*, imaju mnogo fotofora, dok kod vrste *S. baueri baueri* koja obitava između 500 i 2000m dubine, u potpunosti izostaju fotofori. Ima još mnogo dokaza koji ukazuju na činjenicu da je evolucijski razvoj fotofora usko povezan s dubinom na kojem vrste iz ove porodice obitavaju. (Wong, Perez-Moreno, Chan, Frank, Bracken-Grissom, 2014.)

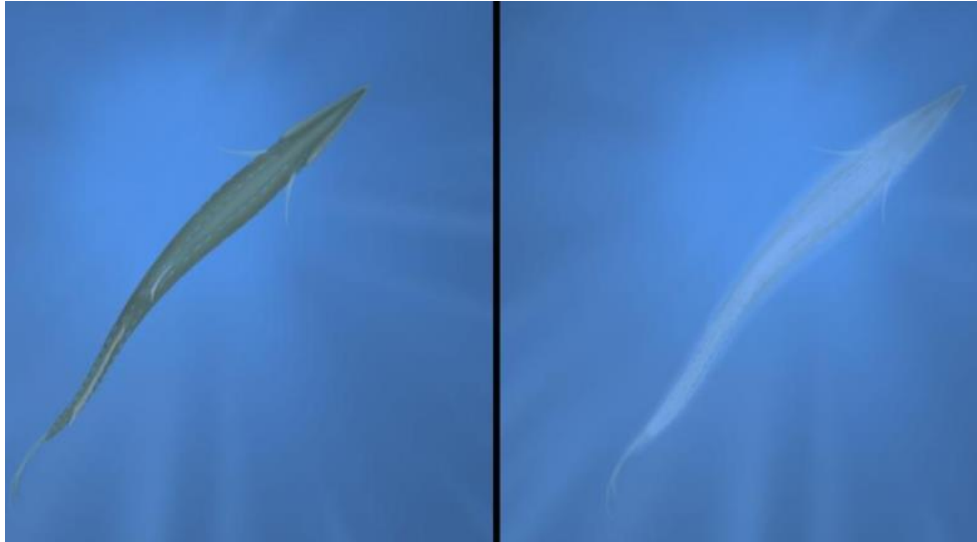
2.3. Uloge bioluminescencije

2.3.1. Zaštita od neprijatelja

Često životinje koriste snažan bljesak bioluminescencije kako bi se uplašio predstojeći neprijatelj. Svjetlosni signal može odvratiti pažnju neprijatelja i izazvati u njemu zbunjenost o mjestu gdje se nalazi. Ovakva tehnika zaštite posebno je bitna za dubokomorske organizme, počevši od malih veslonošaca pa sve do lignji razmjernih veličina. Primjerice *Swima bombiviridis* vrsta je dubokomorskog mnogočetinaša koji kada se nađe u opasnosti, otpušta tzv. bioluminescentnu „bambu“ iz svoga tijela. Neke životinje kao što je dubokomorska lignja *Octopoteuthis deletron* u slučaju opasnosti, odbacuju svoje bioluminescentne dijelove tijela te na takav način zbune predatora. (Web 5)

Ovakav način zaštite koriste i morske zvijezde odbacujući svjetleće krakove u okolnu vodu koje grabežljivac slijedi prilikom čega zvijezda može uspješno pobjeći, dok druge životinje kao što su neke vrste morskih krastavaca odbacuju svjetleće dijelove tijela na životinje koje im se nađu u blizini te ih na takav način učine plijenom grabežljivca. (Web 6)

Još jedan efektivan način zbunjivanja neprijatelja javlja se kod nekih vrsta hobotnica i rakova koje izbace svjetlucavi sekret u okolnu vodu te ga na takav način odbiju ili zastraše, a oni lakše mogu pobjeći od potencijalne opasnosti, dok druge vrste oko sebe stvore „svjetleći oblak“. (Web 2) Osim toga, sposobnost bioluminescencije može poslužiti prilikom kamuflaže određene životinjske vrste na način da svjetleći organi na donjoj strani životinje mogu odgovarati slaboj svjetlosti koja dolazi s površine, što čini životinju teže uočljivom za grabežljivce koji traže plijen odozdo i obrnuto. (Web 5) Primjerice, kod dubokomorskih riba svjetleći organi se nalaze na ventralnoj i lateralnoj strani tijela, a svjetlost se emitira prema dolje ili prema van (Slika 11.). Vjeruje se da ovakav položaj svjetlećih organa omogućuje podudaranje njihove svjetlosti sa intenzitetom Sunčeve koja prodire odozgo, čime prikriva vlastitu sjenu ribe od grabežljivca ispod. (Web 7) Poseban način kamuflaže posjeduje *Idiacanthus atlanticus*, riba iz porodice *Stomiidae* koja ima sposobnost emitiranja crvene svjetlosti koju morski grabežljivci nisu u mogućnosti vidjeti. Zanimljivo je da čak i sam *Idiacanthus* ne može vidjeti crveno svjetlo te se umjesto toga oslanja na relej pigmenata kako bi "preokrenuo fluoresciranje" reflektiranog crvenog svjetla u plavo i zeleno koje može vidjeti. (Web 2)



Slika 11. Prikaz kamuflaže dubokomorske ribe (Web 5)

2.3.2. Hranjenje

Životinje mogu iskoristiti sposobnost bioluminescencije kako bi privukle plijen prema svojim ustima ili osvijetlile područje u blizini tako da mogu vidjeti svoj sljedeći obrok što bolje. Primjerice, rod hobotnica *Stauroteuthis* na ovakav način privlači svoj plijen. (Web 5) Vrsta *Stauroteuthis syrtensis* je jedna je od samo dvije vrste hobotnica koje pokazuju bioluminescenciju (Slika 12.). *S. syrtensis* emitira plavo-zeleno svjetlo pomoću četrdeset modificiranih fotofora smještenih u jednom redu između para osjetnih privjesaka (cira) na donjoj strani svakog kraka. Udaljenost između njih se smanjuje prema krajevima krakova dok svjetlost postaje slabija. Životinja ne emitira svjetlost kontinuirano, ali može to učiniti pet minuta nakon odgovarajuće stimulacije. Neki fotofori emitiraju kontinuirani tok slabe prigušene svjetlosti, dok drugi emitiraju puno jače svjetlo i periodično se uključuju i isključuju stvarajući tzv. „twinkling effect“ na plijen. Pomoću ove sposobnosti privlači male planktonske rakove koji su joj glavni izvor hrane. (Web 8)



Slika 12. Vrsta svjetleće hobotnice *Stauroteuthis syrtensis* (Web 9)

Svjetlost također može zavarati i veće životinje kao što su kitovi i lignje. Oni su privučeni svjetlošću koja se nalazi s dolje strane nekih vrsta morskih pasa, primjerice *Isistius brasiliensis* koji ih, kada im se pruži prava prilika, pojedu. Nadalje, vrste riba iz reda *Lophiiformes* nazvane još i udičarke zbog karakteristične „svjetleće udice“ na glavi, u dubokom moru mame plijen izravno u svoja usta pomoću visećeg bioluminescentnog nastavka na glavi kojeg zapravo čini prvi produženi leđni kralježak, osvijetljen sjajnim bakterijama koje proizvode svjetlost (Slika 13.). (Web 5)



Slika 13. *Lophiiformes* (udičarke) (Web 10)

2.3.3. Privlačenje suprotnoga spola

Životinje ne trebaju bioluminescenciju kako bi tražile i privukle svoj plijen; ona također može igrati bitnu ulogu u privlačenju partnera. Primjerice muške jedinke ljuskara s otočja Kariba koristi bioluminiscentne signale na gornjim usnama kako bi privukao ženke. Mnogočetinaši iz porodice *Syllidae* koji žive na morskom dnu, kreću se prema otvorenom dijelu mora za početka punog mjeseca gdje ženke nekih vrsta, poput *Odontosyllis enopla*, koriste bioluminescenciju kako bi privukle muškarce dok se kreću u krugovima (Slika 14.). Smatra se čak da su ovi sjajni mnogočetinaši svojom svjetlošću pomogli Cristopheru Columbu u pronalasku Novoga Svijeta. (Web 5)



Slika 14. Vrsta svjetlećeg mnogočetinaša *Odontosyllis enopla* (Web 11)

Nadalje, neke skupine riba kao što su one iz reda *Lophiiformes*, te porodica *Leiognathidae* i *Anomalopidae* primarno koriste bioluminescenciju kako bi mogle razlikovati žensku od muške jedinke te komunicirati s njima u svrhu parenja (Web 5) , dok primjerice ribe iz porodica *Myctophidae* i *Sternoptychidae* zajedno s mnogim drugim dubokomorskim organizmima, posjeduju poseban raspored svjetlosnih organa na tijelu koji može poslužiti kao obrazac prepoznavanja vrste i spola. Neke vrste iz porodice *Myctophidae* dodatno posjeduju veliki svjetleći nosni organ na prednjem području glave, dok druge imaju dio svjetlosnog tkiva u repnom području. (Web 7)

Osim kod morskih organizama, ovakve načine privlačenja suprotnoga spola pronalazimo i kod mnogih vrsta na kopnu. *Photinus pyralis*, najčešća vrsta krijesnice u Južnoj Americi, dobar je primjer (Slika 15.). Mužjak ove vrste spontano šalje svjetleće signale dok je u letu,

emitirajući prosječno bljesak trajanja 0,3 sekunde svakih 5,5 sekundi, ako je temperatura 25 ° C (77 ° F). Ženke promatraju s tla te čekaju svjetlosni signal mužjaka. Otprilike dvije sekunde nakon što primijeti signal, ženka *Photinus pyralis* šalje isti kao povratni odgovor kako bi privukla mužjaka. Ženka ne može identificirati muškarca pomoću njegovih svjetlećih signala, već je mužjak taj koji prepoznaje točan signal- tj. interval između signala- i traži ženku. Dakle, upravo je interval između muškog i ženskog svjetlećeg signala od presudne važnosti za prepoznavanje i privlačenje suprotnoga spola.

Slične specifične načine prepoznavanja koriste mnoge druge vrste krijesnica te se one vjerojatno oslanjaju na razlike u boji svjetlećih signala između različitih spolova. (Web 7)



Slika 15. Vrsta *Photinus pyralis* (Web 12)

2.4. Bioluminescencija i ljudi

2.4.1. Bioluminescencija i znanost

Biolozi i inženjeri proučavaju kemikalije i sve činjenice vezane uz bioluminescenciju kako bi razumjeli načine na koje ljudi mogu iskoristiti ovaj proces u svoju korist. Primjerice, zeleni fluorescentni protein (GFP), vrijedan je "reporterski gen". Tzv. reporterski geni su kemikalije (geni) koje biolozi vežu na druge gene koje proučavaju.

GFP reporter geni lako se identificiraju i mjere zahvaljujući upravo ovom procesu. To omogućuje znanstvenicima praćenje aktivnosti promatranog gena – njegove eksprimiranosti u stanici ili interakcije s drugim kemikalijama. (Web 6)

Nadalje, luminescentna reakcija krijesnica upotrijebljena je kao metoda za određivanje adenozin trifosfata (ATP), važne metaboličke supstance koju koriste sve žive stanice u brojnim reakcijama u kojima se energija pohranjuje ili potroši. Svjetlost posebno uklopljenog ekstrakta svjetla krijesnice smanjuje se i nestaje dok se ATP razgrađuje. Dodavanje svježeg ATP, bilo kao čiste kemikalije ili kao sastavnice ekstrakta tkiva, odmah vraća luminescenciju. Intenzitet sjaja izravna je mjera količine ATP-a prisutnog u ekstraktu. Ta se metoda analize široko koristi u medicinskim i biološkim istraživanjima kako bi se odredila količina ATP-a prisutnih u ekstraktima stanica i tkiva. Proučavanje reakcija koje uključuju ATP dovelo je do detaljnog razumijevanja mehanizama pretvorbe energije u stanicama. Reakcija luminescencije u krijesnica je jedna od rijetkih reakcija u kojima je ATP izravno vezan uz proces emitiranja svjetlosti, sve druge bioluminescentne reakcije uključuju spojeve koji su kemijski različiti od ATP-a. (Web 7)

Ostale upotrebe bioluminescencije obuhvaćaju npr. bioluminescentna stabla koja mogu pomoći osvijetliti gradske ulice i autoceste što bi smanjilo potrebu za strujom. Isto tako, bioluminescentni usjevi i druge biljke koji mogu zasvijetliti kad im je potrebna voda ili druge hranjive tvari, ili kada su spremni za ubiranje te smanjuju troškove proizvodnje u poljoprivredi. (Web 6)

2.4.2. Bioluminescencija i umjetnost

Životinjama koje posjeduju sposobnost bioluminescencije ona predstavlja način komuniciranja i zaštite od neprijatelja, ali za ljude, boje i svjetlost koja se proizvodi ovim procesom predstavlja prava umjetnička djela.

Privremena izložba u Nacionalnom prirodoslovnom muzeju u 2012. istraživala je veze između umjetnosti i znanosti. Umjetnik Shih Chieh Huang kreirao je viseće luminescentne instalacije u mračnom prostoru muzeja koje su izgledale kao da plutaju u dubokom moru. Neki umjetnici koriste bakterije i niže životinjske organizme za stvaranje tzv. živućih crteža ili čak cjelokupnih izložbi koje uključuju Petrijeve zdjelice pune malih svjetlećih jednostaničnih organizama (Slika 16.). (Web 5)



Slika 16. *"The Bright Beneath: The Luminous Art of Shih Chieh Huang"* (Web 5)

3. ZAKLJUČAK

Sposobnost bioluminescencije uvelike je pomagala te pomaže različitim životinjskim organizmima u njihovom svakodnevnom životu, što dokazuju istraživanja od njenog najranijeg razvitka pa sve do danas.

Tri najbitnije uloge bioluminescencije su privlačenje plijena u svrhu hranjenja, privlačenje suprotnoga spola u svrhu parenja te zaštitna uloga. U ulozi privlačenja plijena, vrlo je bitan položaj i veličina svjetlosnih organa te dovoljna količina emitirane svjetlosti od strane bakterija unutar organa kojim će određena životinja privući svoj plijen te ga iskoristiti kao obrok. Nadalje, zaštitna uloga bioluminescencije predstavlja važnu ulogu u životu određene jedinke te se razlikuje od vrste do vrste ovisno o tome gdje vrsta obitava te tko joj je predator. Vrlo bitna uloga bioluminescencije je privlačenje partnera za razmnožavanje. Emitiranje svjetlosti ili vizualna osjetljivost na neuobičajeno dugim ili kratkim valnim duljinama ukazuju na to da se bioluminescencija koristi kao privatni komunikacijski kanal među jedinkama, čak puno češće nego kao zaštitni mehanizam ili za privlačenje plijena. Prisutnost specifičnih fotoformnih uzoraka i spolnog dimorfizma sugerira da organizmi koriste ta obilježja kako bi se razlikovali međusobno. (Haddock, Moline, Case, 2010.).

Osim u svakodnevnom životu životinjskih organizama, ova sposobnost također pomaže i ljudima u stvaranju nove umjetnosti, isto kao i u vidu različitih znanstvenih istraživanja na poljima medicine, biologije, kemije te još mnogih drugih.

4. LITERATURA

Matoničkin, I. (2010.) Opća zoologija, Zagreb, Školska knjiga

Haddock, S.H.D., Moline, M.A., Case J.F. (2010.) Bioluminescence in the sea. *Annu. Rev. Mar. Sci.* 2, 443-493

Martin, G.J., Branham, M.A., Whiting, M.F., Bybee, S.M. (2016): Total evidence phylogeny and the evolution of adult bioluminescence in fireflies (Coleoptera: Lampyridae). *Molecular Phylogenetics and Evolution*

Thacker, C.E., Roje D.M. (2009): Phylogeny of cardinalfishes (Teleostei: Gobiiformes: Apogonidae) and the evolution of visceral bioluminescence. *Molecular Phylogenetics and Evolution*. Natural History Museum of Los Angeles. Los Angeles, USA

Wong, J.M., Perez- Moreno J.L., Chan T., Frank T.M., Bracken-Grissom H.D. (2014): Phylogenetic and transcriptomic analyses reveal the evolution of bioluminescence and light detection in marine deep-sea shrimps of the family Oplophoridae (Crustacea: Decapoda). *Molecular Phylogenetics and Evolution*. USA, Taiwan

Haddock, S.H.D., Moline M.A., Case, J.F. (2010): Bioluminescence in the sea. Article in *Annual Review of Marine Science*. Monterey Bay Aquarium Research Institute. California, USA

Web izvori:

Web 1- Science daily: Bioluminescence.

<https://www.sciencedaily.com/terms/bioluminescence.htm>

Web 2- The quantum immortal: Bioluminescence

<http://www.quantum-immortal.net/physics/biolum.php>

Web 3- Science Direct: Bioluminescence activity of *Latia* luciferin analogs

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0040403900006390>

Web 4- Pubchem: *Latia* luciferin

https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Latia_luciferin#section=2D-Structure

Web 5- Smithsonian: Bioluminescence

<https://ocean.si.edu/ocean-life/fish/bioluminescence>

Web 6- National Geographic: Bioluminescence

<https://www.nationalgeographic.org/encyclopedia/bioluminescence/>

Web 7- Encyclopedia Britannica: Bioluminescence

<https://www.britannica.com/science/bioluminescence>

Web 8- Wikipedia: *Stauroteuthis syrtensis*

https://en.wikipedia.org/wiki/Stauroteuthis_syrtensis#Bioluminescence

Web 9- Our breathing planet: Bioluminescent octopus
<https://www.ourbreathingplanet.com/bioluminescent-octopus/>

Web 10- Frogfish: The Deep Sea Anglerfish
<https://www.frogfish.ch/deepsea-anglerfish.html>

Web 11- The Cephalopod page: Marine Invertebrates of Bermuda
<http://www.thecephalopodpage.org/MarineInvertebrateZoology/Odontosyllisenopla.html>

Web 12- iNaturalist: Common eastern firefly (*Photinus pyralis*)
<https://www.inaturalist.org/taxa/129350-Photinus-pyralis>

Web 13- Fishes of Australia: Wood's Siphonfish, *Siphamia cephalotes* (Castelnau 1875)
<http://fishesofaustralia.net.au/home/species/4232>