

Uloga bioluminiscencije kod krijesnica (Lampiridae)

Jedvaj, Elena

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of biology / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za biologiju**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:181:440744>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-14**



**ODJEL ZA
BIOLOGIJU**
Sveučilište Josipa Jurja
Strossmayera u Osijeku

Repository / Repozitorij:

[Repository of Department of biology, Josip Juraj Strossmayer University of Osijek](#)



Sveučilište Josipa Strossmayera u Osijeku

Odjel za biologiju

Preddiplomski studij biologije

Elena Jedvaj

Uloga bioluminiscencije kod krijesnica (*Lampiridae*)

Završni rad

Osijek, 2019. godine

Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku

Odjel za biologiju

Preddiplomski sveučilišni studij Biologija

Znanstveno područje: Prirodne znanosti

Znanstveno polje: Biologija

Uloga bioluminiscencije kod krijesnica (*Lampiridae*)

Elena Jedvaj

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

Mentor: doc.dr.sc. Goran Vignjević

Kratki sažetak završnog rada: Proizvodnja svjetlosti, točnije, bioluminiscencija je proces koji kod različitih vrsta životinja omogućuje komunikaciju, prije svega za privlačenje suprotnog spola prilikom razmnožavanja, obranu od predatora te ishranu. Jedna od poprilično istraženih skupina životinja s bioluminiscentnom sposobnošću su krijesnice (*Lampiridae*), s tim da su europske vrste krijesnica one koje su poprilično malo istražene. Sami obrasci ponašanja manifestiraju se upravo proizvodnjom svjetlosti što je produkt kemijskih reakcija mnogih učesnika, s tim da je najophodniji kemijski spoj luciferin. Proces urbanizacije, industrijalizacije te općenito negativnih čimbenika u kojima je glavni akter čovjek imaju ogroman utjecaj na brojnost ovih vrsta, što ih čini sve rjeđim vrstama kukaca.

Jezik izvornika: hrvatski

Ključne riječi: krijesnice, Europa, luciferin, obrana, aposemantizam

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

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

The role of bioluminescence in fireflies (*Lampiridae*)

Elena Jedvaj

Thesis performed at: Department of Biology, Subdepartment of Zoology

Supervisor: Goran Vignjević, PhD, Assistant Professor

Short abstract: Light production or bioluminescence rather, is a process that allows communication in many different species of animals, especially for attracting the members of the opposite sex during mating, defense against predators and feeding. One of the most researched groups of animals with bioluminescent abilities are fireflies (*Lampiridae*), considering that the European species of fireflies are researched much less than others. Behavior patterns are actually manifested in light production, which is a chemical reaction of many products, in order that the most necessary chemical compound is luciferin. Processes of urbanization, industrialization and just negative factors in general, where humans are the protagonists, have a huge influence on members of these species, which makes them all less common among other species of animals.

Original in: Croatian

Key words: fireflies, Europe, luciferin, defense, aposematism

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	1
2. OSNOVNI DIO	2
2. 1. Karakteristike europskih vrsta krijesnica (<i>Lampiridae</i>)	2
2.1.1. Sistematika i najučestalije europske vrste krijesnica (<i>Lampiridae</i>)	2
2.1.2. Biologija i ponašanje europskih vrsta krijesnica (<i>Lampiridae</i>)	5
2.2. Kemija bioluminiscencije – luciferin	7
2.3. Uloga bioluminiscencije	9
2.3.1. Smještaj organa za proizvodnju svjetlosti	9
2.3.2. Koristeći svjetlost krijesnice „pričaju“ – privlačenje suprotnog spola	10
2.3.3. Bioluminiscencija za obranu od predatora	14
2.4. Primjena bioluminiscencije u životu	16
3. ZAKLJUČAK	18
4. LITERATURA	19

1. UVOD

Preko stotinu milijuna godina traje evolucija životinja u proizvodnji svjetlosti kako bi se obranile, privukle hranu, komunicirale te kao proizvod komunikacije, privukli partnera za parenje, što je ono najvažnije u održanju bioraznolikosti živog svijeta. Emitiranje svjetlosti koja je rezultat kemijske reakcije odvijene u organizmu životinje, odnosno, bioluminiscencija opisuje očaravajuće nadrealnu prirodu živog organizma koji sadrži dijelove tijela za takvu aktivnost. Tu sposobnost posjeduju mnoga morska živa bića koja pripadaju različitim životinjskim skupinama, od praživotinja, preko spužvi, žarnjaka, rebraša, vrpčara, mekušaca, kolutićavaca, rakova, stonoga, kukaca, bodljikaša, žiroglavaca, plaštenjaka pa sve do riba. Ipak, naistraživanija bioluminiscentna aktivnost je fokusirana upravo na kukce, odnosno krijesnice (*Lampiridae*) (Matoničkin, 2010.).

Istraživanje krijesnica (*Lampiridae*) započelo je još prije par stoljeća u Europi. Prethodna istraživanja ponašanja i ekologije europskih vrsta su dosta slaba u odnosu na ostale kontinente. Moguće objašnjenje za manjak istraživanja se može potražiti u činjenici da europske vrste teže upadaju u oko samog promatrača, što je prouzročeno sjevernim položajem zbog kojeg Europa ima relativno niži biodiverzitet, u usporedbi s činjenicom da gotovo sva raznolikost tih vrsta leži u području umjerene klimatske zone gdje je bioraznolikost općenito manja nego u tropskim i subtropskim područjima. Također, taj sjeverni položaj uzrokuje zalazak sunca kasno u ljeto i pojavu krijesnica tek kasno navečer (De Cock, 2009.).

Tako je 1980. godine bilo poznato samo oko 35 vrsta krijesnica, dok do danas razlikujemo oko 64 vrste europskih krijesnica, unutar samo 8 rodova. Očekuje se da se još mnogo novih vrsta tek mora otkriti, pogotovo u istočnim i južnim dijelovima Europe gdje su mnoge vrste izostale u identifikaciji tijekom prošlosti, kakva se situacija zadržala sve do danas. Veliki stupanj urbanizacije, industrijalizacije i intenzivne agrokulture ima negativan utjecaj na broj krijesnica čineći ih rijetkima u mnogim europskim zemljama.

2. OSNOVNI DIO

2. 1. Karakteristike europskih vrsta krijesnica (*Lampiridae*)

2.1.1. Sistematika i najučestalije europske vrste krijesnica (*Lampiridae*)

Porodica krijesnica (*Lampiridae*) obuhvaća 7 podporodica, oko 67 rodova i oko 2000 vrsta što se odnosi na općenitu brojnost vrsta krijesnica ne samo na teritoriju Europe, već u cijelome svijetu. Porodica *Lampiridae* spada u red *Coleoptera* (kornjaši), nadred *Coleoptera* (tvrdokrilaši), podrazred *Pterygota* (krilaši), razred *Insecta* (kukci), potkoljeno *Hexapoda* (šesteronošci), koljeno *Arthropoda* (člankonošci) te carstvo *Animalia* (životinje). Vrste nekih rodova su morfološki 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 (Matonićkin, Habdija, Primc - Habdija, 1999.)

Neke od najbolje poznatih vrsta u Europi su:

Lampyris noctiluca (ivanjska krijesnica) koja je uobičajena krijesnica, jedna od prvih lampiridnih vrsta koju je opisao Linnaeus, bez sumnje jedna od najbolje proučavanih europskih vrsta. Ona je ujedno i najrasprostranjenija krijesnica s distribucijom na gotovo cijelom Palearktiku, pojavljuje se na područjima od Portugala do sjeverne Kine ako gledamo od zapada prema istoku, te od polovice Skandinavije pa do Kavkaza ako gledamo u smjeru od sjevera prema jugu. Neke od karakteristika su da ženka nema krila. Mužjaci posjeduju dva para krila, ali za letenje koriste samo drugi par krila. Mužjaci su općenito manji od ženki. Boja jedinki se proteže od smeđe pa do crne. Za ljetnih noći svijetleći mužjaci lete uz grmlje, iz kojeg im se svjetlosnim signalima javljaju ženke. Odrasli i ličinke uz pomoć šiljastih čeljusti hvataju puževe koji mogu biti i mnogo veći od njih tako što ubrizgaju neurotoksine te na taj način imobiliziraju sam plijen. Najaktivnije su noću dok preko dana provode vrijeme u svojim vlažnim nastambama. Ličinački stadiji su također aktivniji noću. Odrasle oblike je ipak lakše uočiti jer oni svijetle nekoliko sati prije nego što se spare kada prestaju svijetliti (Slika 1. i 2.) (Web 7).



Slika 1. i 2. Mužjak (lijevo) i ženka (desno) vste *Lampyris noctiluca*(Web 7)

Pelania mauritanica je vrsta koja je zapažena u južnim dijelovima Europe, kao što je južna Francuska, južni Portugal i Španjolska. U prošlosti su bili poznati samo mužjaci s normalnim krilima sve dok se nisu počele koristiti svjetleće zamke koje privlače mužjake te na taj način otkriveno da mužjaci imaju skraćena krila. Ženke obično borave u rupama u tlu, a izlaze samo na kratko vrijeme tijekom noći s nakanom da privuku mužjake tako što konstantno svijetle. Ženke imaju sposobnost da nakon noćne svjetleće aktivnosti pronađu put natrag u svoju rupu u tlu koja može biti udaljena i 20 do 30 cm, a to ukazuje na korištenje neke vrste feromonskih tragova. Još jedna zanimljivost što se tiče ličinki i ženki roda *Pelania* je što one ne nastanjuju samo rupe u tlu, već borave i unutar mravljih nastambi. Često su u suživotu s miroljubivim i prijateljski nastrojenim vrstama mravi (*Messor barbara*, *Messor instabilis* var. *Maroccana*, *Pheidole sinaitica*). Svi životni stadiji su neugroženi, ali vjerojatno i postoji neka kemijska zaštita koju izlučuju same krijesnice koje odbijaju mrave od njih. Ove vrste preferiraju mravlje nastambe jer su temperatura i stupanj vlažnosti visoko regulirane, a pošto su te vrste još i zaštićene već spomenutim kemijskim obrambenim mehanizmima, te nastambe su najbolji izbor u sušnim uvjetima diljem svijeta. Također, takav životni prostor predstavlja dobro mjesto za razvoj jaja, ličinki te kukuljica, a isto tako su dostupni izvori hrane u mravljim nastambama (poput puža *Ruminia decollata*) (De Cock, 2009.).

Lamprohiza splendidula je nabolje proučavana europska vrsta nakon *Lampyris noctiluca*. Ova vrsta je više rasprostranjena u centralnoj Europi. Morfolološka sličnost ličinačkih i adultnih stadija je usporedna gotovo u potpunosti onima kod vrsta *Lampyris noctiluca*.

Phosphaenus hemipterus je vrsta koja naseljava područja Nove Škotske te Kanade, čime je ova vrsta jedina europska vrsta koja je uvezena na drugi kontinent. Na prvi pogled ova vrsta ne izgleda uopće kao krijesnica. Mužjaci su sićušni, dužina od glave do kraja trupa doseže do 10 mm, imaju relativno velika ticala, koja su otprilike veličine kao pola dužine njihova tijela. Ono što mužjaka čini isključivo neobičnima, možda i posebnima među krijesnicama je to što su mužjaci gotovo uvijek bez krila. Postoji mnogo poznatih vrsta gdje su ženke bez krila, ali ovo je jedina vrsta krijesnica gdje niti jedan spol nema sposobnost letenja. Krila su reducirana na male ostatke pokriveno jednako malim krilnim poklopcima (Slika 3.) (De Cock, 2009.).



Slika 3. Ličinka vrste *Phosphaenus hemipterus*(De Cock, 2009.)

Luciola lusitanica je treća najbolje istražena europska vrsta krijesnica nakon *Lamprys noctiluca* i *Lamprohiza splendidula* (Slika 4.).



Slika 4. Ličinka vrste *Luciola lusitanica*(De Cock, 2009.)

Rod *Phosphaenopterus* koji broji dvije vrste: vrsta *Phosphaenopterus montandoni* koja nastanjuje područje Rumunjske i *Phosphaenopterus metzneri* koja nastanjuje područja Portugala i francuskih Pireneja.

Već spomenute četiri vrste krijesnica (*Lampyris noctiluca*, *Pelania mauritanica*, *Phosphaenus hemipterus*, *Lamprohiza splendidula*) su vrste koje su i najbolje i najviše opisane u dostupnim znanstvenim radovima (njihov stupanj istraženosti najveći), prvenstveno radi svoje velike i česte rasprostranjenosti u Europi, što ukazuje i na laku dostupnost tih vrsta prilikom raznih eksperimenata i istraživanja koja se provode na njima.

2.1.2. Biologija i ponašanje europskih vrsta krijesnica (*Lampiridae*)

Ekologija i ponašanje samih europskih vrsta u najviše slučajeva su proučavane kod četiri vrste *Lampiridae*: *Lampyris noctiluca*, *Lamphoriza splendidula*, *Phosphaenus hemipterus* i *Luciola lusitanica*. To proizlazi iz činjenice da su upravo ove vrste jedne od najučestalijih i najrasprostranjenijih vrsta krijesnica u Europi. Krijesnice su što se tiče ishrane primarno karnivori. Nijedan odrasli stadij europskih krijesnica nije u mogućnosti hraniti se, točnije, nikada nije ni zabilježeno da se adultni stadiji hrane. Znanstvenici nisu sigurni ako ponekad jedu, što bi to moglo uopće i biti. Moguće je jedino da to bude polen biljaka ili nektar, ali gotovo je sa sigurnošću potvrđeno da se uopće ne hrane ničim u adultnom stadiju. Stoga, oni se oslanjaju na unutrašnje masno tkivo koje su izgradili za vrijeme ličinačkog stadija. Taj ličinački stadij može trajati i do tri godine ovisno o vrsti, ali i klimatskoj zoni tog staništa. Ličinke se razlikuju prema odabiru tipa ishrane. Većina vrsta krijesnica aktivno lovi puževe golaće (*Arionoidea*). Sićušna ličinka je u mogućnosti svladati plijen koji je i do tisuću puta veći od nje same, koristeći pri tom oštru, šuplju čeljust koja služi za ubrizgavanje snažnog toksina koji paralizira žrtvu i tada počinje probavljati njezinu unutrašnjost. Tako vrsta *Lampyris noctiluca*, odnosno njena ličinačka faza, preferira određene fenotipske oblike puža *Cepaea nemoralis* kao plijen. Krijesnica vrste *Phosphaenus hemipterus* svojoj prehrani preferira gliste. Kod nekih vrsta su zabilježeni i primjerci kanibalizma, gdje se jedna vrsta hrani drugom (Web 2).

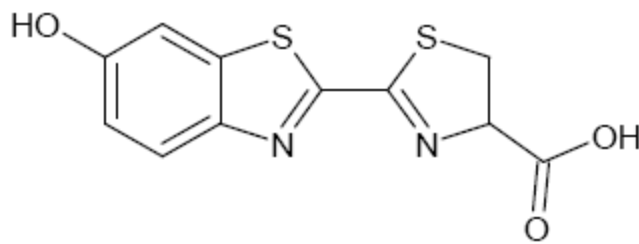
Odrasla krijesnica živi dovoljno dugo da dođe do sparivanja mužjaka i ženke te da se izlegnu jaja. Upravo radi tog kratkog razdoblja njihove životne uloge, potreba za ishranom nije nužna (Web 1). Odrasle jedinke žive u prosjeku oko godinu do dvije, od jednog

razdoblja sparivanja ženke s mužjakom do drugog., sve dok ne postanu adultni stadiji ine daju život novoj generaciji. Ličinke provode cijeli svoj život loveći i jedući plijen i nakon šest do osam presvlačenja većina vrsta (*Lamprys noctiluca*, *Luciola lusitanica*, *Phospaenus hemipterus*) se začahure, što je faza kukuljice, ispod lišća, kamenja, dijelova kore, u pukotine unutar tla, u mahovine ili pak u mravinjake. Jedina vrsta *Luciola lusitanica* gradi začahurene komore od blata unutar tla, a vrste iz roda *Lamphorizagrade* ćelije od malih dijelova otpalog lišća. Ostale europske krijesnice ne grade nikakve specifične formacije u kojima bi prebivali u fazi kukuljice. Vodeni ličinački stadiji u Europi nisu poznati. Što se tiče boje tijela, ličinke nekih vrsta pokazuju uočljive uzorke boja na tijelu, obično to bude kombinacija bjelkastih ili žućkasto-narančastih bočnih područja tijela na crnoj baršunastoj podlozi (rod *Lamprys*, vrste *Pelania mauritanica*, *Phospaenopterus metzneri*), ili crna baršunasta podloga s fluorescentnom ljubičastom bojom ili bojom fuksije (*Lampyrus sardiniae*, *Nyctophila reichii*). Tako uočljivi uzorci boja karakteristični su kod vrsta koje se nazivaju „walk– about“ ličinke koje pokazuju promjenu u dnevnim aktivnostima, a kod zrelijih ličinki značajni su izloženi obrasci ponašanja koji prate potragu za pogodnim mjestom koje bi dobro poslužilo za skrivanje kukuljice. Takve ličinke često su poznate kod vrsta *Lampyrus noctiluca*, *Lampyrus sardinae*, *Phospaenus hemipterus* i *Pelania mauritanica*. Krijesnice su s vremenom evoluirale što se tiče obrazaca izlaganja boja upravo radi dnevnih predatora koji su izrazito vođeni vizualnim znakovima, kako bi im izgledale što neukusnije ili čak otrovne, što će naravno predatore onda odbiti. Upravo takva anti-predatorska i obrambena strategija je bolje poznata pod nazivom aposemantička obojenost koja se još naziva i opominjuća obojenost tijela (De Cock, 2009.).

Još neki primjerci europskih vrsta krijesnica imaju „zagrobne“ načine života gdje se ne izlažu previše potencijalnim predatorima, pa tako i pokazuju bezizražajnu i uobičajenu smeđu kamuflažnu boju koja se stapa s bojom suhog lišća ili tlom kao pozadinom na kojoj borave.

2.2 Kemija bioluminiscencije – luciferin

Krijesnice (*Lampiridae*) imaju sposobnost odvijanja kemijskih reakcija unutar njihovog tijela, što im kasnije omogućava svijetljenje. Taj proces je uobičajeno poznat pod nazivom bioluminiscencija (Web 5). Isto tako, sam način na koji se ta svjetlost proizvodi najbolje je poznata i opisana upravo kod krijesnica. Dokazano je *in vitro* da je za bioluminiscenciju neophodan luciferin (LH₂), koji proizvodi svjetlost, enzim luciferaza, koja katalizira tu reakciju; kisik, magnezij i adenzin-trifosfat (ATP). Sam luciferin zahtjeva ATP kao kofaktor za svoju aktivnost, pa se prema tome može i koristiti kao indikator stanične aktivnosti, za što se i koristi u medicinske svrhe (Slika 5.) (Web 8).



Slika 5. Prikaz strukturne kemijske formule luciferina u krijesnica (Web 13)

Kemijska reakcije teče na način da enzim luciferaza katalizira oksidaciju luciferina (LH₂) uz prisutnost kisika. Produkt te reakcije je uz svjetlost (često u području zelenog ili plavog dijela spektra), i inaktivan oksiluciferin. Ponekad luciferin i katalizatorski protein (ekvivalent luciferazi), gdje je prisutan i kofaktor kisik, mogu reagirati tako da se povežu u dugu strukturu fotoproteina. Takva molekula može onda biti potaknuta na proizvodnju svjetlosti ako se u cijelu reakciju doda ion, kao što bi bio ion kalcija, gdje onda uz ponovni nastanak svjetlosti, nastaje i inaktivni oksiluciferin (Web 6.). Životinje koje svijetle intracelularno, što bi značilo unutar žive stanice, imaju sposobnost obnavljanja svjetleće tvari. Zapravo, imaju sposobnost pretvaranja oksilucifeina ponovno u luciferin. Na taj se način luciferin može više puta iskoristiti i ne mora se ponovno proizvoditi, što je jako dobar primjer ekonomičnosti u prirodi i životinjskom svijetu.

Proizvodnja luciferina i luciferaze moguća je samo u živoj stanici. Međutim, za pretvaranje lucifeina u oksiluciferin nije potrebna živa stanica, a takav

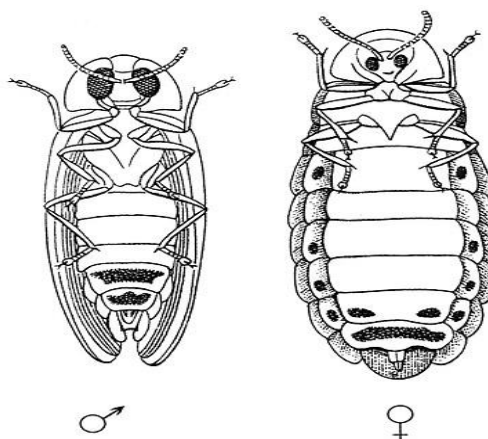
isključivo kemijski proces može teći i neovisno o živoj strukturi. Upravo zato je moguće da životinje s tom sposobnošću još neko vrijeme svijetle nakon smrti. Krijesnica kontrolira kraj i početak kemijske reakcije, a samim time i početak i zaustavljanje emisije svjetlosti, dodavanjem kisika drugim spojevima potrebnim za proizvodnju svjetla. Ovaj proces događa se u svjetlosnom organu kukaca. Kada je kisik dostupan, svjetlosni organ svijetli, a kada nije dostupan, svjetlost se gasi. Kukci imaju traheje kao dio dišnog sustava, pa uz pomoć njih transportiraju kisik izvana u stanice tijela. Dugo vremena nije bilo poznato kako krijesnice kao tako sićušni organizmi uspiju proizvesti tako snažan bljesak svjetlosti, s obzirom na malu brzinu rada mišića koji kontroliraju brzinu transporta kisika. Znanstvenici su nedavno doznali da dušikov oksid (isti plin koji se proizvodi uzimanjem lijeka Viagre), igra ključnu ulogu u kontroli bljeskanja (Web 3). Kada je svjetlo krijesnice „isključeno“, tada se ne proizvodi dušikov oksid. U toj situaciji, kisik koji ulazi u svjetlosni organ vezan je za površinu stanice koje grade mitohondrije pa nije u mogućnosti transportirati se do svjetlećeg organa. Tako prisutnost dušikovitog oksida tu potpomaže jer se on veže za mitohondrij i omogućuje kisiku da dopire do tih organa gdje će se spojiti s potrebnim kemijskim spojevima (luciferin i ostali) koji će omogućiti proizvodnju svjetlosti, odnosno bioluminiscencijsku reakciju. Kako dušikov oksid brzo nestaje, čak i prije nego što se sama bioluminiscencijska reakcija odvije, molekule kisika bivaju opet zarobljene u stanicama mitohondrija i nisu dostupne u odvijanju reakcija za proizvodnju svjetlosti.

Bitno je reći da je bioluminiscencija hladna svjetlost. Upravo se zato u tom procesu 80 do 92% energije pretvara u svjetlost, dok je gubitak u obliku topline neznatan, tek nekih 8 do 20%. Usporedbe radi, obične električne žarulje pretvaraju samo 3 do 4% energije u svjetlost, dok se 96 do 97% energije gubi u obliku topline (Matoničkin, 2010.). Dakle, ono što je u životinjskom svijetu idealno riješeno, čovjek još godinama neće uspjeti postići. Sintetičku svjetlost danas možemo proizvesti samo pomoću luciferina i luciferaze koje proizvode neke životinje. Hladno svjetlo je kod životinja postignuto prije svega što ono nije sastavljeno od čitavog vidljivog spektra, nego samo od njegova dijela. To vidljivo područje sunčanog spektra leži između 360 nm (ljubičasto) i 780 nm (crveno). Spektar svjetla što ga proizvode životinje suprotan je sunčevu svjetlu, izrazito skraćen na oba kraja. Tako na primjer, spektar ivanjske krijesnice (*Lampyrus noctiluca*) leži između 523 nm i 655 nm. To je žuto i zeleno područje koje najbolje odgovara našem oku. Crvene ili tople zrake potpuno nedostaju ivanjskoj krijesnici (*Lampyrus noctiluca*) pa je iz tog razloga svjetlost hladna (Web 7.).

2.3. Uloga bioluminiscencije

2.3.1. Smještaj organa za proizvodnju svjetlosti

Organi za svijetljenje kod odraslih jedinki su smješteni na ventralnoj strani, u području stražnjih kolutića abdomena. Ali, moguće je i postojanje svjetlosnih točaka na lateralnim stranama tijela, gdje je smještena po jedna svjetleća točka na rubovima kolutića. Naravno, bitno je spomenuti kako se položaji svjetlećih organa razlikuju od roda do roda, pa i od vrste do vrste, tako se razlikuju i između mužjaka i ženke iste vrste. U pravilu, razlika položaja organa koji svijetle nije toliko značajna, dok u pojedinim slučajevima je. Tako, ženski organi za svjetlost kod vrsta iz roda *Lamphoriza* imaju drugačiji smještaj od ostalih. Izgledom se sastoji od normalnih svjetlećih organa karakterističnih za odrasle jedinke, koji se nalaze u ventralnim V. i IV. segmentima, koje također nazivamo ventriti (tergiti VI. + VII.) te ovisno o individui i samoj vrsti, posjeduje još dodatnih 4 do 12 manjih svjetlosnih točaka koje su naslijeđene još iz stadija ličinke u trbušnom predjelu (Slika 6.). Ženke tog roda pokazuju velik broj individualnih varijacija u broju lateralnih svjetlosnih organa, točnije točaka. Ženke roda *Lamphorizane* savijaju svoj abdomen u stranu kako bi omogućile da svijetlost sja prema gore, već one podižu svoj abdominalni dio, koji je u potpunosti opremljen svjetlosnim organima, prema gore. Suprotno ženkama iz različitih rodova koje konstantno svijetle, vrste ovog roda ne svijetle konstantno te se penju na različite vrste biljaka kako bi emitirale svoju svjetlost, ali u pravilu češće ostaju na zemlji (na otpalom lišću) (De Cock, 2009.).



Slika 6. Prikaz položaja svjetlećih organa mužjaka i ženke vrste *Lamphoriza splendidula* (De Cock, 2009.)

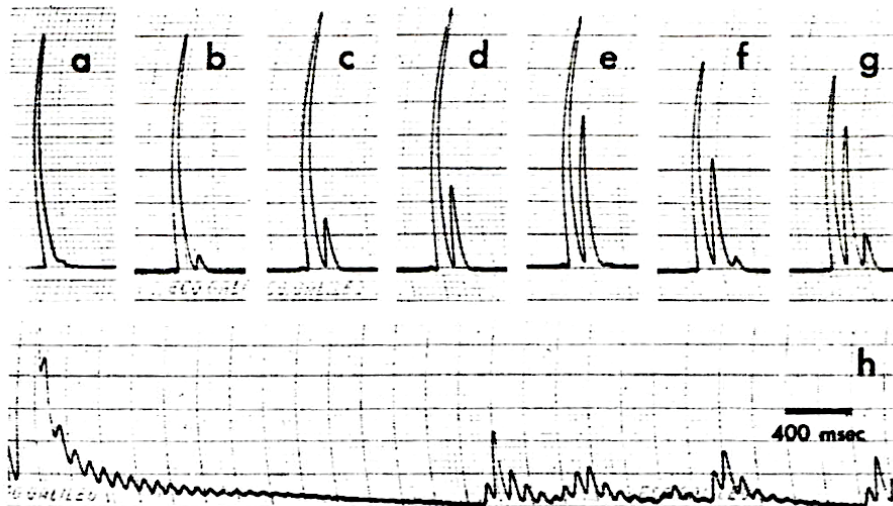
2.3.2. Koristeći svjetlost krijesnice „pričaju“ – privlačenje suprotnog spola

Prije svega, krijesnice koriste bioluminiscenciju za svoju komunikaciju, kao što je već spomenuto. Specifično bljeskanje, točnije svijetljenje karakteristično za svaku vrstu je jedan oblik evolucijske prilagodbe, odnosno mehanizam koji sprječava druge vrste krijesnica da ne dođe do *interbreedinga* ili nastajanja neplodnih potomaka. U svijetu krijesnica, što je svjetlosni signal intenzivniji, to bolje (Gajendra Babu, Kannan, 2002.).

Schwalb u svom laboratorijskom eksperimentu u kojem koristi uzorke modela svjetlosnih organa ženke, uviđa da mužjake vrste *Lamphoriza splendidula* privlači bilo koja boja koja im je izložena (crvena, žuta, zelena, plava), ali u više slučajeva, najviše preferiraju uzorke plave svjetlosti. S druge strane, mužjaci vrste *Lampyris noctiluca* snažno preferiraju žutu svjetlost (otprilike valne duljine 550 nm). Također je zamijetio da isti ti mužjaci vrste *Lampyris noctiluca* preferiraju modele sa sličnim intenzitetom i istim uzorkom svjetlosnih organa kao što posjeduju prirodne ženke, dok mužjaci vrste *Lamphoriza splendidula* odabiru mamce intenzivnijeg sjaja. Zadnja promatranja ukazuju na to da postoji jaka selekcija mužjaka za intenzivnije emisije svjetlosti. Ista stvar je i za mužjake vrste *Lampyris noctiluca*, gdje oni odabiru modele s već nagoviještenim uzorkom svjetlosnih organa, prirodnom jačinom svjetlosti i bojom koju emitiraju, a ujedno je to točno ono što vidimo u prirodi. Istraživanja Schwalba provedena u laboratoriju su ipak kontradiktorna istraživanjima u okolišu jer su u prirodi mužjaci roda *Lampyris* mnogo manje izbirljivi za bojom i intenzitetom svjetlosnih zamki (korišteno je zeleno ili žuto LED svjetlo, svjetleće cijevi itd.), dok se mužjaci vrste *Lamphoriza splendidula* vrlo teško ili čak nemoguće namame u bilo kakvu svjetlosnu zamku (De Cock, 2009.).

Za ženke mnogih vrsta je karakteristično da mogu odgovarati stalnom latencijom na signale mužjaka, a specifične razlike u vremenu latencije pod utjecajem različite temperature može biti svojstvo po kojima bi se vrste razlikovale jedna od druge što se taksonomije tiče. Komunikacijski sustav vrste *Luciola lusitanica* mogu se klasificirati kao *HP* sustav prema Ohbi ili Sustav II prema Loydu. Prema tim sustavima, mužjaci lete i svijetle s neusmjerenom frekvencijom, a ženke na mušku svjetlost odgovaraju s usmjerenim prekidima i prepoznatljivim odbljescima svjetlosti koji imaju različitu duljinu trajanja, oblik ili ritam s obzirom na muške bljeskove. Kod većine vrsta su

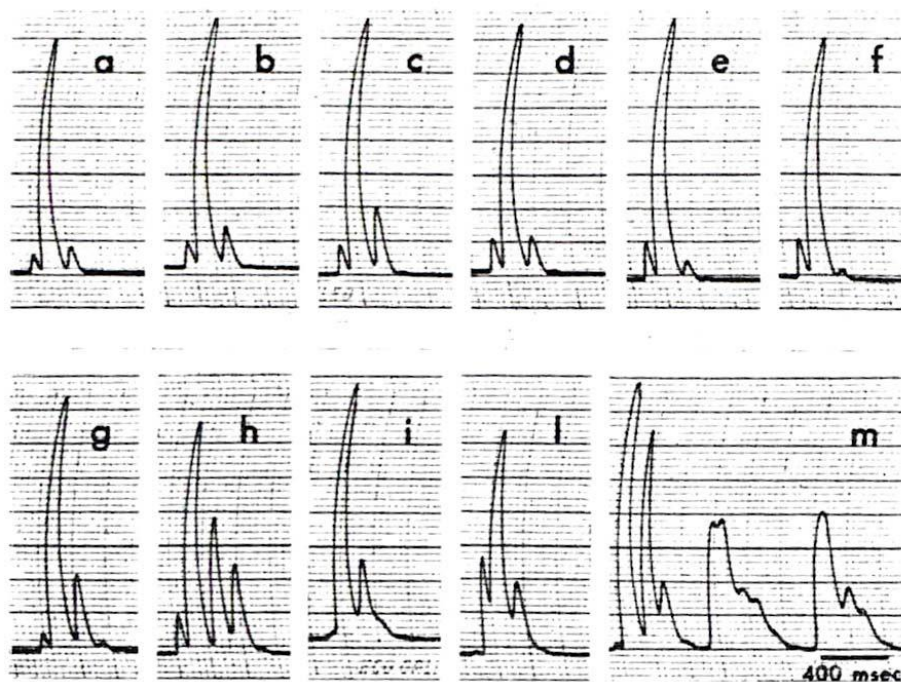
tako ženke te koje diskriminiraju, provjeravaju i reagiraju na točnu valnu duljinu svjetla koju mužjaci emitiraju, broj pulseva koji emitiraju te duljinu pulsiranja. Kod već navedene vrste, mužjaci su ti koji diskriminiraju tako što vode svjetlosni dijalog mijenjajući frekvenciju boje i provjeravajući može li odgovarajuća ženka uistinu reagirati na promjene u svjetlosti određene duljine i nakon određene odgode. U oba spola vrste *Luciola lusitanica* emitiranje bioluminiscencije može se sastojati od čistog svjetlucanja, kao i prigušene svjetlosti koja se emitira u određeno vrijeme. Leteći mužjaci prosječno emitiraju svjetlost 1,8 puta u sekundi na 17 stupnjeva Celzijusevih sa povremenom emisijom prigušenog svjetla tijekom faze međusvjetljenja (Slika 7.). Takve prigušene emisije svjetla su možda prilagodbe na osvjetljenje i mogu se sastojati od bliskog slijeda kratkih nepravilnih bljeskova ili više kao normalno treperenje.



Slika 7. Obrasci svjetljenja mužjaka vrste *Luciola lusitanica*; (a-g) prikazani bljeskovi mužjaka različitih oblika; (h) prikaz polaganog gašenja s treperenjem i prigušenim svjetlom (De Cock, 2009.)

Ženke ove vrste se nikada ne mogu vidjeti u letu, dakle one ne lete. Imaju deblja i teža tijela te kraća krila i kraće krilne poklopce nego mužjaci. One redovno odgovaraju tipičnim bljeskom (Slika 8.) na svaki stimulans brzo rastućeg intenziteta, bez obzira na sam intenzitet stimulansa, duljinu ili raspon boje (između 413 nm što je ljubičasta svjetlost i 682 nm što je crvena svjetlost). Bljesak odgovora emitira se uz posebnu odgodu nakon stimulansa sa odgodom koji se eksponencijalno povećava na nižim temperaturama. Kada se frekvencija stimulansa progresivno poveća iznad brzine od 2 bljeska po sekundi, ženka isprva odgovara 1:1 određeni kraći period, inače zasvijetli jednom na svaki drugi stimulans

i zatim više ne odgovara redovno. U ritmičkoj stimulaciji svjetlosnim pulsom s polako rastućim intenzitetom, ženke ne reagiraju ili reagiraju nepravilno, ponekad bljeskajući brzinom gotovo istom kao bljesci stimulansa, ali sa nepoznatom povezanošću između stimulansa i bljeska odgovora.

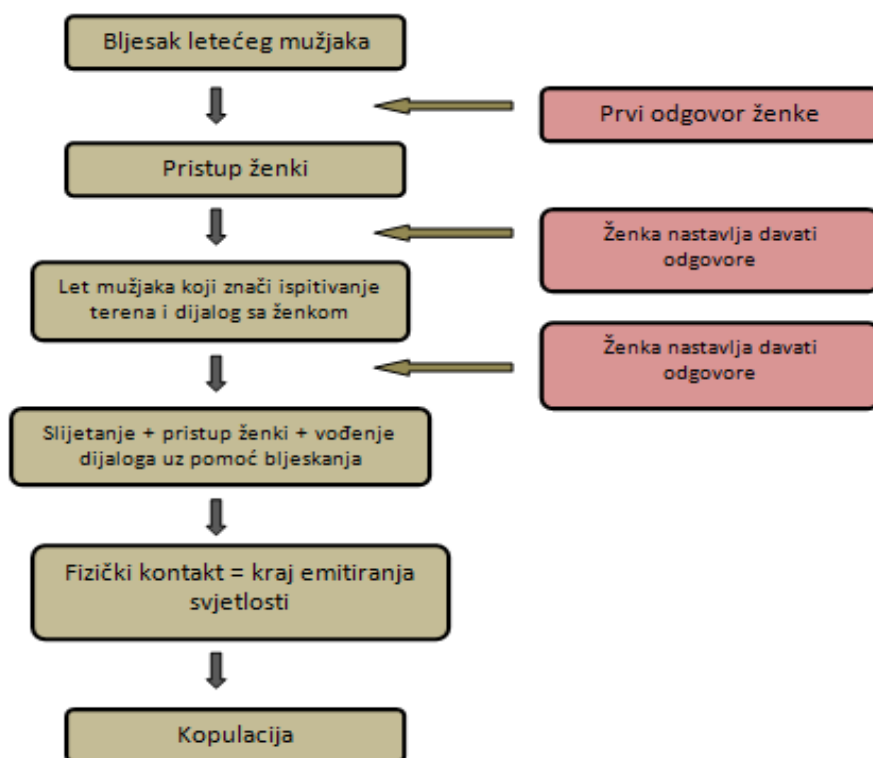


Slika 8. Obrasci svijetljenja ženki vrste *Luciola lusitanica*; (a-g) bljesci kao odgovori na dijalog; (h-m) nepravilni bljeskovi kada su jedinke uznemirene ili kada se prekidaju bljesci koji su odgovori na dijalog (De Cock, 2009.)

Mehanički stimulirani mužjaci i ženke čiji su svjetlosni dijalozi s mužjacima bili prekinuti, pokazuju nepravilno bljeskanje s većom valnom duljinom sastavljenom od više dostignutih maksimuma, gdje se može zapaziti i treperenje koje je vidljivo ljudskom oku.

Leteći mužjaci pri primanju ženskih odgovora na bljesak letjet će prema ženkama, provesti let dijaloga/ istraživanja duljine trajanja varijabli, a onda sletjeti i prići ženki pužući po podu (Slika 9.). Podloga na kojoj se ženka nalazi igra veliku ulogu jer se faza istraživanja/dijaloga može produžiti ovisno o karakteristikama okoline u kojoj se ženka nalazi. Dijalozi bljeskom događaju se tijekom svih faza prilaženja ženki, ali sve, ili bar gotovo sve emisije svjetlosti prestaju odmah nakon fizičkog kontakta partnera. Spektralne karakteristike svjetlosnog signala ženke nemaju važnu ulogu jer bljesci različite boje u rasponu valne duljine od 473 nm do najmanje 644 nm, mogu privući mužjaka. Značajke odgovora ženke koji igra važnu ulogu u muškom prepoznavanju i pozitivnom odgovoru

(rezultirajući napuštanjem ili dobivanjem ženke) su duljina bljeska i latentnost u odgovoru bljeskom. Oblik bljeska ženke (trostruki bljesak) nema velikog utjecaja na samo ponašanje mušjaka.



Slika 9. Shema generalnog protokola komunikacije bljeskom i prilaska te kopulacije mušjaka i ženke vrste *Luciola lusitanica* (prevedeno i prilagođeno prema De Cock, 2009.)

Mušjaci ponekad svijetle nepravilno, a ponekad pokazuju tipove ženskih odgovora na stimulaciju svjetlom. Takvo ponašanje se često javlja kod mušjaka koji su bili neuspješni u dijalogu s ženkom. S takvim bljescima, ti mušjaci prisiljavaju druge mušjake koji lete iznad njih da sudjeluju u dijalogu propitkivanja s njima i da ih povremeno i osvoje. Muško- muški dijalozi mogu imati više oblika. Odbijeni mušjaci od strane ženki mogu prisustvovati u izmjenama bljeskova prateći određena pravila. Najčešći tip dijaloga (a-b, a-b...) stimulira heteroseksualni dijalog s jednim mušjakom (a – vođa) koji vodi dijalog s drugim mušjakom (b – pratitelj) koji reagira nakon pravilne odgode kao ženka. Mušjak koji oponaša ženku vrlo često blješti nepravilno, kao odgovor na ritmičku

stimulaciju svjetlom, zadržavajući frekvenciju jako blizu brzini stimulacije, ili dostavlja 1:1 normalan odgovor. Latencija odgovora kod ženki koje stimuliraju da su mužjaci je više varijabilna od prave latencije ženke. U drugom tipu dijaloga vođa emitira dva bljeska na svaki bljesak pratitelja (a1- b – a2, a1- b – a2...). Drugi bljesak je možda odgovor na bljesak pratitelja, dok pratitelj ne može postati vođa zbog visoke frekvencije bljeskova. Postoji i treći, manje korišteni dijalog (a-b-a-b...) gdje nema razlike između dva mužjaka. Prema Papiju, biološka važnost takvog svjetlosnog dijaloga kod dva mužjaka je da prisile ostale mužjake da ispitaju područja gdje bi se mogla naći ženka kojoj je teško prići, i na taj način povećaju šanse za oplodnjom (De Cock, 2009.). Izgleda da je takvo ponašanje češće uključeno u kompleksne intraseksualne konkurentne strategije koje nisu još potpuno razjašnjene.

2.3.3. Bioluminiscencija za obranu od predatora

Kod mužjaka vrste *Lamphoriza splendidulase* čini da bioluminiscencija nije uključena u signaliziranje udvaranja jer ženke te vrste sjaje spontano i ne reagiraju na svjetleće mužjake koji lete iznad njih. Tako mužjaci slijeću dalje od ženki i par centimetara pužu do njih, bez ikakvog sjaja. Dakle, muški sjaj nije uključen u izbor ženke, isključivo ako više mužjaka stigne do ženke odjednom. Stoga, sama bioluminiscencija mužjaka ove vrste ukazuje na drugu funkciju, a to bi bila uloga obrane od grabežljivaca kao na primjer šišmiša (*Chiroptera*) ili noćnih jastreba (*Caprimulgoidea*).

Općenito, *Lampiridae*, uz bljeskove i sjaj upozorenja, pokazuju još nekoliko značajki koje poje podržavaju hipotezu zaštite aposemantizmom (Web 4.). Kod nekih vrsta je dokazana kemijska obrana, u obliku kardiotoksičnih steroida ili takozvanih lucibufagina i ostalih otrova. Činjenica da krijesnice upotrebljavaju kemijski način obrane od predatora nalaže da njihov aposentizam funkcionira kroz izbjegavanje učenja. Brojni opisi mirisa potvrđuju da neke vrste krijesnica mirišu na biljke (kupus), gljive, pepermint pa se predlaže da one koriste mirise upozorenja. Obrambeni organi, koji liče na žlijezde su opisani kod vrste *Lampyris noctiluca*, pokazuju refleksno krvarenje koje dolazi do izražaja u nekim slučajevima opasnosti, kao što je prisutstvo mravi (Web 2.). Pokusi s gušterima kao grabežljivcima supokazali da uzorci različitih boja u kombinaciji s crvenom, crnom i žutom kod nekih vrsta odraslih stadijakrijesnica služe kao boje upozorenja (Slika 10.). Mnoge vrste krijesnica imaju neobično obojene ličinke koje su aposemantički zaštićene od

napada ptica. Kod nekih vrsta, ličinke postaju diurnalne prije procesa zakukuljavanja i u tom slučaju aposemantizam može biti korisna adaptacija. Više fiziološka teza da je bioluminiscencija uključena u obrambenu aktivnost proizlazi iz neurofiziološkog procesa kod ličinki koji je kontroliran specijaliziranim neuronima i transmitterom oktopaminom, koji se inače kod ostalih vrsta kukaca aktivira u stresnim situacijama kao što je susret s grabežljivcima. U nekih vrsta krijesnica, ovaj neurološki sustav također uključuje već spomenuto refleksno krvarenje kod ličinki. Sve ove teze ne samo da podržavaju mogućnost luminiscentnog aposemantizma, već također predlaže da *Lampiridae* mogu koristiti multimodalne signale u kojima mirisi i vizualne komponente djeluju zajedno kako bi povećale aposemantički signal. Još poneki dokazi koji podržavaju kemijske načine obrane od predatora unutar ostalih svjetlećih tvrdokriša, Phengodidae i Elateroidea, uključuju postojanje Müllerianove mimike (primjeri gdje neke druge otrovne vrste životinja koriste slične signale za prikazivanje svojih obrambenih sposobnosti) ili Batesianove mimike (u tim primjercima određena bespomoćna vrsta „laže“ kopirajući signale upozorenja od prave vrste koja posjeduje obrambenu sposobnost). Također, odrasle vrste krijesnica emitiraju žutu svjetlost za razliku od zelene svjetlosti koju emitiraju ličinke svih vrsta, što predstavlja indicaciju mimike u stadiju ličinke kod različitih vrsta (De Cock, 2009.).



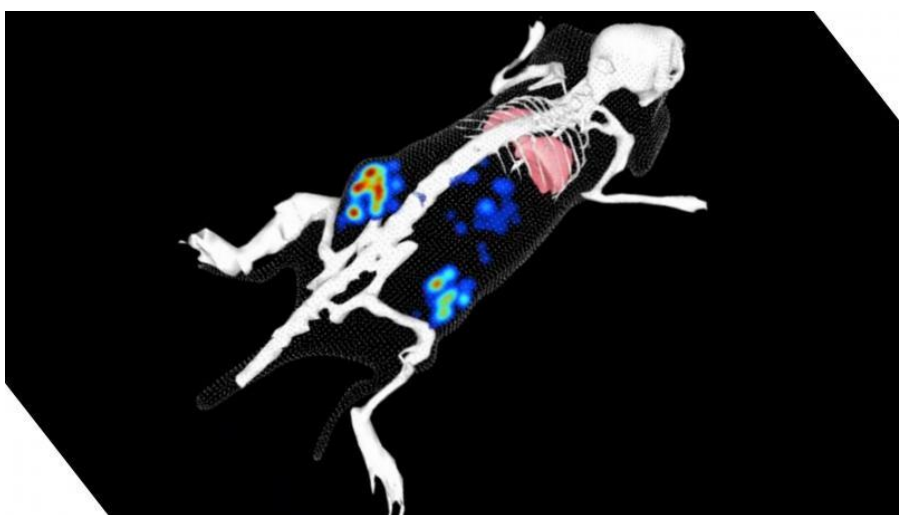
Slika 10. Primjerci aposemantičke obojenosti kod krijesnica (Web 12)

2.4. Primjena bioluminiscencije u životu

Fenomen bioluminiscencije se može koristiti kao vrijedan znanstveni alat u mnogim biološkim pokusima.

Istraživanje svemira jedan je od prvih primjena. Luciferin i luciferaza se može koristiti u svemirskim letjelicama koje se šalju na Mars ili na druge planete kako bi se istražila postojanost drugih oblika života. Ideja je da poseban elektronički uređaj prikupi tekućinu sa svemirske površine i pomiješa je s vodom, kisikom, luciferinom i luciferazom . Tada, ako bi svjetlost dopirala natrag do Zemlje, mogli bi znati da ATP, koji je peti učesnik u nastajanju svjetlosti (odvijanju bioluminiscencije) postoji u svemiru. Čak i mala količina, kao što je kvadriliontni dio grama ATP-a, može biti dovoljna da podraži elektronske detektore. Prisutnost ATP-a zauzvrat sugerira na postojanje nekog oblika života u Svemiru koji je dijelom nalik životu na Zemlji.

Ako govorimo o medicinskoj primjeni, postojanje ATP-a u svakom živom organizmu je iskorišten u mnogim medicinskim istraživanjima. Ubrizgavanje luciferina i luciferaze u organizam ljudi pokazuju različite reakcije u zdravim stanicama i stanicama raka (Slika 11.) , i mogu pomoći u otkrivanju energetske probleme u ljudskim stanicama. Ova tehnika se sada koristi za proučavanje bolesti srca, mišićnih distrofija, uroloških problema itd.



Slika 11. 3-D bioluminiscentna snimka za kvantificiranje relativnog broja stanica raka dojke obilježenih luciferazom u masnim abdominalnim stanicama miša (Web 13)

Također, moguća je uporaba i u molekularnoj biologiji gdje se sposobnost bioluminiscencije može koristiti kao fluorescentni genski markeri. Takvi fluorescentni genski markeri pospješuju da transformirane stanice u koje je uveden takav genski marker svijetle pod određenim osvjetljenjem. To pomaže znanstvenicima u odabiranju upravo onih stanica koje imaju željeni gen i na taj način lakše odbacuju ostale stanice koje ne sadrže ciljani gen (Gajendra Babu, Kannan, 2002.).

3. ZAKLJUČAK

Danas ne znamo puno o bilouminiscenciji različitih vrsta životinja, pa tako i *Lampiridae*, iako se samo područje smatra poprilično istraživano s tim da sva istraživanja kreću 60-ih i 70-ih godina 20. stoljeća. Nažalost, brojna istraživanja se od tih godina nisu nastavila punim intenzitetom. Mnogi provedeni pokusi i istraživanja bi mogli i trebali biti ponovljeni u današnje vrijeme jer zasigurno možemo koristiti veća znanja o postavljanju samih pokusa i obradi statističkih podataka. Iako je istraživanje europskih vrsta krijesnica također počelo vrlo rano, posebno u srednjim i sjevernim državama Europe, još treba puno toga otkriti o ekologiji i luminiscentnom ponašanju; detaljima njihovog komunikacijskog sustava, a isto tako i o njihovim filogenetičkim odnosima. No, nada za brojna istraživanja u budućnosti postoji jer su krijesnice (*Lampiridae*) u posljednje vrijeme postale suviše popularne svjetleće „bube“ koje stvaraju predivne prizore za vrijeme ljetnih noći. Upravo iz tog razloga, čak i ljudi koji nisu znanstvenici pokazuju dosta zanimanja za njih, tema su mnogih volonterskih anketa u umjetničkim, okolišnim i edukacijskim projektima (Zimmer, 2016.)

Osim istraživanja samih vrsta, gorući je problem opadanje brojnosti populacija raznih vrsta krijesnica. Uzrok naravno leži u antropogenim utjecajima, kao što je uništavanje staništa, fragmentacija istih te njihovo propadanje u konačnici. Sve je to posljedica velikog utjecaja agrokulture, prekomjerne industrijalizacije i urbanizacije, masovne konzumacije i zagađivanje voda, uporaba pesticida i svjetlosnog zagađenja. Također, klimatske promjene i globalno zatopljenje izgledaju kao još veće moguće buduće prijetnje što nikako ne ide u prilog ovim naizgled „čarobnim“ kukcima.

4. LITERATURA

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

Matoničkin, I., Habdija, I., Primc- Habdija, B. (1999.) Beskralješnjaci. Biologija viših avertebrata, III. Izdanje, Zagreb, Školska knjiga

Zimmer, M. (2016.) Bioluminescence: Nature and Science at Work, Minneapolis, Twenty First Century Books

De Cock, R. (2009.) Biology and behaviour of European lampyrids. Meyer- Rochow, V. B. Bioluminescence in focus- a collection of illuminating essays. 385 (161-200)

Gajendra Babu, B., Kannan, M. (2002.) Lightning Bugs. Resonance- Journal of Science Education, Volume 7 Issue 9 (49-55)

Web izvori:

Web 1- National Geographic: Fireflies

<https://www.nationalgeographic.com/animals/invertebrates/group/fireflies/>

Web 2 - Firefly : Facts about fireflies

<https://www.firefly.org/facts-about-fireflies.html>

Web 3 - Science American: How and why do fireflies?

<https://www.scientificamerican.com/article/how-and-why-do-fireflies/?redirect=1>

Web 4 - New Scientist: Fireflies don't just glow for sex, they do it to warn away bats too.

<https://www.newscientist.com/article/2177756-fireflies-dont-just-glow-for-sex-they-do-it-to-warn-away-bats-too/>

Web 5 – Bioluminescence: What is bioluminescence?

<http://bioluminescentprocesses.weebly.com/about-bioluminescence.html>

Web 6 –Science: How light works?

<https://science.howstuffworks.com/light8.htm>

Web 7 – Animal diversity: Lampyris noctiluca

https://animaldiversity.org/accounts/Lampyris_noctiluca/

Web 8 – The Bioluminescence Web Page: Chemistry of bioluminescence

<https://biolum.eemb.ucsb.edu/chem/detail2.html>

Web 9 – BioLib: Glow worm (*Lampyris noctiluca*)

<https://www.biolib.cz/en/image/id24064/>

Web 12- iNaturalist: Common eastern firefly (*Photinus pyralis*)

<https://www.inaturalist.org/taxa/129350-Photinus-pyralis>

Web 13 – Graduate Dartmouth: Cancer biology, pharmacology and molecular therapeutics

<https://graduate.dartmouth.edu/pemm/about/program-overview/cancer-biology-pharmacology-and-molecular-therapeutics>

Web 13- The quantum immortal: Bioluminescence

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