

Pregledni rad DOI: 10.5937/DDD26100P

BIOLARVICIDI SLEDEĆE GENERACIJE SA ODRŽIVIM I UNAPREĐENIM SISTEMIMA UV ZAŠTITE

NEXT-GENERATION BIOLARVICIDES WITH SUSTAINABLE AND ENHANCED UV PROTECTION SYSTEMS

Branislav Pešić^{1*}

Kratak sadržaj

Biolarvicidi predstavljaju značajnu komponentu savremenih strategija kontrole larvi vektora i drugih štetnih insekata, jer omogućavaju selektivniji i ekološki prihvatljiviji pristup u odnosu na konvencionalne hemijske larvicide. U radu je razmotren njihov značaj, osnovne prednosti i ograničenja, sa posebnim osvrtom na problem varijabilne efikasnosti u uslovima praktične primene. Kao jedan od ključnih faktora ograničene postojanosti izdvojeno je UV zračenje, koje dovodi do degradacije aktivnih bioloških komponenti i smanjenja larvicidnog učinka. Posebna pažnja posvećena je savremenim formulacionim pristupima zasnovanim na mikroenkapsulaciji, biopolimernim matricama, lignin-baziranim nosačima i prirodnim fotoprotektivnim agensima, koji omogućavaju unapređenje stabilnosti i funkcionalnosti preparata. Na osnovu analiziranih saznanja istaknuto je da razvoj biolarvicida sledeće generacije mora da integriše biološku aktivnost, formulacionu stabilnost, otpornost na UV stres i operativnu primenljivost, kako bi se obezbedila njihova veća pouzdanost i šira primena u održivoj kontroli larvi.

Ključne reči: *Bacillus thuringiensis*, biolarvicidi, formulacija biopesticida, fotostabilnost, kontrola vektora, mikroenkapsulacija, održiva kontrola larvi, UV zaštita

Abstract

Biolarvicides represent an important component of modern larval control strategies for vectors and other harmful insects, as they enable a more selective and environmentally acceptable approach compared with conventional chemical larvicides. This paper examines their importance, main advantages, and limitations, with particular emphasis on the problem of variable efficacy under practical application conditions. UV radiation is identified as one of the key factors limiting persistence, as it causes degradation of active biological components and reduces larvicidal performance. Special attention is given to contemporary formulation approaches based on microencapsulation, biopolymeric matrices, lignin-based

¹ Dr sci vet. med. Branislav Pešić, Kmetijski inštitut Slovenije, Ljubljana, Slovenija

* e-mail kontakt osobe: branislav.pesic@kis.si

carriers, and natural photoprotective agents, which can improve the stability and functionality of these products. Based on the analysed evidence, it is emphasized that the development of next-generation biolarvicides must integrate biological activity, formulation stability, resistance to UV stress, and operational applicability in order to ensure greater reliability and broader use in sustainable larval control.

Keywords: *Bacillus thuringiensis, biolarvicides, biopesticide formulation, microencapsulation, photostability, sustainable larval control, UV protection vector control*

UVOD

Bolesti i štetnosti povezane sa insektima čiji razvoj uključuje akvatične larvene stadijume i dalje predstavljaju ozbiljan javnozdravstveni, veterinarski i ekološki problem, posebno u uslovima intenzivnih klimatskih i antropogenih promena. U slučaju komaraca, značaj larvalne kontrole dodatno raste zbog činjenice da su upravo larve prostorno koncentrisane u relativno ograničenim vodenim staništima, što ih čini pogodnom metom za ciljane intervencije u okviru integrisanog upravljanja vektorima (WHO, 2024; Hong i sar., 2025). Ovakav pristup postaje sve važniji u svetlu rastućeg globalnog opterećenja bolestima koje prenose vektori; prema podacima Svetske zdravstvene organizacije, više od 3,9 milijardi ljudi živi u područjima rizika za dengue, dok je tokom 2024. godine zabeležen istorijski maksimum obolevanja na globalnom nivou (WHO, 2024; WHO, 2025). Paralelno s tim, savremene strategije kontrole sve više napuštaju isključivo oslanjanje na adulticide i teže uključivanju mera koje deluju ranije u životnom ciklusu ciljanih organizama, uključujući larval source management i primenu bioloških larvicida (WHO, 2024; CDC, 2024).

U tom kontekstu, biolarvicidi se izdvajaju kao važna komponenta održivijih programa kontrole. Iako terminološki okvir nije uvek u potpunosti ujednačen među institucijama, zajedničko polazište jeste da se radi o pesticidima zasnovanim na prirodnim materijalima, mikroorganizmima ili njihovim biološki aktivnim komponentama. Američka agencija za zaštitu životne sredine definiše biopesticide kao pesticide poreklom iz prirodnih materijala, pri čemu u ovu grupu uključuje biohemijske pesticide, mikrobne pesticide i pesticide inkorporirane u biljke (EPA, 2025a; EPA, 2025b). FAO i WHO u svojim smernicama za registraciju i specifikaciju mikrobnih pesticida naglašavaju da su *microbial pest control agents* i *microbial pest control products* specifična kategorija pesticida koja zahteva prilagođene podatke o identitetu, kvalitetu, efikasnosti i bezbednosti, upravo zbog njihove biološke prirode i različitosti u odnosu na konvencionalne hemijske aktivne supstance (FAO, 2018; FAO, 2023). U evropskom regulatornom okviru, mikroorganizmi namenjeni suzbijanju štetnih organizama tretiraju se kao posebna grupa *microbial plant protection products*, za koje su potrebni zasebni kriterijumi karakterizacije i procene rizika (European Commission,

2024; EFSA, 2025). U užem smislu, biolarvicidi se zato mogu posmatrati kao podgrupa biopesticida namenjena suzbijanju larvenih stadijuma ciljnih insekata, najčešće kroz delovanje živih mikroorganizama, njihovih toksina ili drugih prirodnih bioaktivnih agenasa.

Dosadašnja praksa pokazuje da su bakterijski biolarvicidi, pre svega preparati na bazi *Bacillus thuringiensis* subsp. *israelensis* (Bti) i *Lysinibacillus sphaericus*, i dalje najšire korišćeni i najbolje potvrđeni u operativnim programima kontrole komaraca (Hong i sar., 2025). Njihova prednost leži u visokoj efikasnosti prema ciljanim larvama, relativno povoljnom ekotoksikološkom profilu i dobroj uklopivosti u integrisane programe upravljanja vektorima (WHO, 1999; Hong i sar., 2025). Noviji terenski podaci potvrđuju da kombinovane formulacije Bti i *L. sphaericus* mogu obezbediti značajnu efikasnost i produženu rezidualnu aktivnost, uz istovremeno nizak potencijal za selekciju rezistencije kada se pravilno doziraju i primenjuju u odgovarajućim uslovima (Rique i sar., 2024). Istovremeno, neki autori ukazuju da razvoj biolarvicida više nije ograničen samo na klasične mikrobne preparate, već se sve više usmerava ka multifunkcionalnim formulacijama koje kombinuju aktivnu biološku komponentu sa nosačima, stabilizatorima i sistemima kontrolisanog oslobađanja radi poboljšanja terenske performanse (Verma i sar., 2024; Hong i sar., 2025).

Međutim, uprkos jasnim prednostima, praktična primena biolarvicida i dalje je opterećena brojnim ograničenjima. Jedan od ključnih problema jeste razlika između visoke efikasnosti zabeležene u laboratorijskim uslovima i znatno varijabilnijeg učinka u realnim, otvorenim sistemima. Na terenu na aktivnost biolarvicida utiču temperatura, pH, organsko opterećenje, sedimentacija, padavine, kao i intenzitet sunčevog zračenja, pri čemu upravo insolacija i fotodegradacija često odlučuju o dužini rezidualnog dejstva preparata (Rique i sar., 2024). Zbog toga nauka o formulacijama postaje centralni element razvoja biolarvicida nove generacije. Više nije dovoljno da aktivni agens bude samo biološki potentan; neophodno je da bude dovoljno stabilan tokom skladištenja, transporta i naročito nakon aplikacije, kada je izložen spoljašnjim stresorima koji brzo smanjuju njegovu održivost i efikasnost (Verma i sar., 2024).

Među abiotičkim faktorima, UV zračenje se izdvaja kao jedan od najvažnijih uzroka gubitka aktivnosti mikrobnih i drugih bioloških larvicidnih formulacija. Fotolabilnost spora, kristalnih toksina i drugih bioaktivnih komponenti direktno smanjuje biološku raspoloživost aktivne materije i skraćuje period zaštite nakon aplikacije (Rique i sar., 2024). Upravo zato se poslednjih godina intenzivno razvijaju strategije fotoprotekcije zasnovane na mikroenkapsulaciji, polimernim matricama, nano- i mikro-nosačima i UV-apsorbirajućim aditivima. Noviji eksperimentalni radovi pokazuju da odgovarajuće formulacije mogu značajno poboljšati UV stabilnost *Bt* preparata i očuvati njihovu insekticidnu aktivnost i nakon produženog izlaganja zračenju; na primer, mikroenkapsulacija *Bt* uz upotrebu UV-protektivnih komponenata može gotovo udvostručiti održivost spora u poređenju sa nezaštićenim formulacijama nakon višednevne UV ekspozicije

(Jalali i Maghsoudi, 2024). Ovakvi nalazi potvrđuju da budućnost biolarvicida ne zavisi samo od otkrivanja novih aktivnih agenasa, već podjednako i od razvoja održivih sistema njihove zaštite i isporuke.

Upravo iz te perspektive nastaje koncept biolarvicida sledeće generacije. Pod tim se ne podrazumeva samo novi mikroorganizam ili novi prirodni toksin, već integrisana formulacija koja istovremeno obezbeđuje biološku efikasnost, selektivnost, ekološku prihvatljivost i povećanu stabilnost u uslovima stvarne primene (Verma i sar., 2024). Takav pristup je u skladu sa savremenim zahtevima održive zaštite, jer povezuje biološku kontrolu, napredne materijale, smanjenje hemijskog opterećenja i bolje upravljanje rezistencijom u jedinstven tehnološki okvir (WHO, 2024; Cai i sar., 2025). Shodno tome, razvoj održivih i unapređenih sistema UV zaštite ne predstavlja samo formulaciono unapređenje postojećih preparata, već jedan od ključnih preduslova za širu i pouzdaniju primenu biolarvicida u savremenim programima kontrole larvi.

Značaj, prednosti, ograničenja i problematika primene biolarvicida

Biolarvicidi danas zauzimaju važno mesto u savremenim programima kontrole vektora i drugih štetnih insekata, ne samo kao zamena za deo konvencionalnih hemijskih larvicida, već i kao značajna komponenta integrisanog upravljanja vektorima. Njihov praktični značaj proizlazi iz mogućnosti ciljane primene u larvalnim staništima, čime se delovanje usmerava na osetljivu fazu životnog ciklusa ciljanih organizama. WHO (2024) i CDC (2024) larval source management prepoznaju kao važnu dopunsku meru u sredinama gde su larvalna staništa ograničena, dostupna i predvidiva, dok Hong i sar. (2025) ističu da bakterijski biolarvicidi ostaju među operativno najvažnijim alatima u biološkoj kontroli larvi komaraca.

Poseban značaj biolarvicida ogleda se u njihovoj uklopivosti u koncept održive zaštite i One Health pristupa. Za razliku od široko delujućih hemijskih insekticida, mikrobní biolarvicidi najčešće pokazuju viši stepen selektivnosti prema ciljanim grupama organizama, uz povoljniji ekotoksikološki profil i manji rizik od neželjenih efekata na ljude, domaće životinje i veliki deo neciljane faune. Cai i sar. (2025) naglašavaju da mikrobiološki biopesticidi mogu istovremeno doprineti javnom zdravlju, zaštititi životne sredine i održivijem upravljanju biološkim resursima, dok Verma i sar. (2024) ističu da se njihova prednost u odnosu na sintetičke pesticide ogleda u smanjenju štetnih rezidua, povoljnijem ekološkom profilu i dobroj kompatibilnosti sa održivim sistemima upravljanja. Slično tome, Mawcha i sar. (2025) ukazuju da biopesticidi generalno imaju nižu toksičnost za neciljane organizme i manji potencijal za izazivanje sekundarnih ekoloških poremećaja nego konvencionalni hemijski pesticidi.

Kod biolarvicida na bazi *Bacillus thuringiensis* var. *israelensis* i *Lysinibacillus sphaericus*, dodatna prednost je dobro dokumentovana efikasnost prema larvama medicinski važnih komaraca, uključujući rodove *Aedes*, *Anopheles* i *Culex*.

Hong i sar. (2025) navode da su upravo ova dva bakterijska agensa i dalje najšire primenjivani biološki larvicidi na globalnom nivou, dok noviji eksperimentalni radovi potvrđuju da bakterijski larvicidi mogu postići visok mortalitet ciljnih larvi uz očuvanu bezbednost za druge organizme. Asgarian i sar. (2025) navode da su *Bt* larvicidi evaluirani kao bezbedni i za primenu u rezervoarima vode za piće, uz visoku specifičnost prema larvama komaraca, dok Gavana i sar. (2025) ističu da bakterijski toksini deluju pri veoma niskim dozama, ali uz minimalan uticaj na neciljane organizme i životnu sredinu.

Ipak, uprkos tim prednostima, biolarvicidi nisu univerzalno niti bezuslovno rešenje. Jedno od njihovih najvažnijih ograničenja jeste visoka zavisnost od uslova sredine i kvaliteta same aplikacije. Za razliku od mnogih hemijskih preparata sa dužim rezidualnim delovanjem, brojni biolarvicidi, naročito kratkodelujuće bakterijske formulacije, pokazuju ograničenu postojanost u otvorenim uslovima i zahtevaju pažljivo planiranje vremena tretmana, doze, formulacije i učestalosti ponovne aplikacije. Msugupakulya i sar. (2024) pokazuju da uspešnost biolarvicidnih programa ne zavisi samo od inherentne efikasnosti preparata, već i od tipa staništa, senčenja, dinamike polaganja jaja i brzine larvenog razvoja, pri čemu se kod kratkodelujućih formulacija često koristi interval ponovnog tretiranja od oko nedelju dana, upravo zbog ograničenog rezidualnog efekta. Slično tome, CDC (2024) naglašava da je larvalna kontrola najefikasnija kada su staništa malobrojna, stabilna i lako dostupna, dok je njen učinak znatno manji kada su legla brojna, rasuta i privremena.

Važan praktični problem predstavlja i jaz između laboratorijske i terenske efikasnosti. U kontrolisanim uslovima moguće je obezbediti optimalnu koncentraciju aktivne supstance, homogenu raspodelu u medijumu i minimalan uticaj spoljašnjih faktora, dok su u realnim staništima larve izložene složenoj kombinaciji ekoloških i fizičko-hemijskih uticaja. Rique i sar. (2024) pokazuju da i kod dugodelujućih mikrobni larvicida na bazi kombinacije *Bti* i *L. sphaericus* efikasnost i trajanje delovanja značajno zavise od uslova na terenu i tipa ciljne vrste, dok Hong i sar. (2025) ukazuju da organsko opterećenje vode, temperatura, pH, insolacija i karakteristike staništa mogu snažno modifikovati biološki odgovor tretiranih organizama. Upravo zbog toga se savremena istraživanja sve više pomeraju od pukog testiranja aktivne komponente ka razvoju kompleksnih formulacija prilagođenih stvarnim uslovima primene.

Najzad, iako se biolarvicidi često ističu kao bezbedniji i održiviji, njihov razvoj i šira primena i dalje su suočeni sa formulacionim, regulatornim i evaluacionim izazovima. Karaoglan i sar. (2024) ukazuju da su upravo mikrobiološki pesticidi specifični kada je reč o testiranju bezbednosti za neciljane organizme i proceni rizika, što može usporiti proces registracije i standardizacije. Uz to, Papadopoulou i sar. (2025) naglašavaju da će budućnost mikrobni sredstava za zaštitu zavisiti od sposobnosti da se prevaziđu problemi stabilnosti, konzistentnosti učinka i pouzdane terenske validacije. Zbog svega navedenog, savremeni razvoj biolarvicida sve manje se zasniva samo na izboru biološki aktivnog

agensa, a sve više na integraciji mikrobiologije, tehnologije formulacija, ekologije i drugih nauka. Upravo u tom okviru postaje jasno zašto su fotostabilnost i zaštita od UV degradacije postali jedno od centralnih pitanja u razvoju biolarvicida sledeće generacije.

UV zračenje kao ključni faktor degradacije biolarvicida

Među faktorima koji neposredno određuju funkcionalnu postojanost biolarvicida nakon aplikacije, UV zračenje zauzima posebno mesto jer deluje direktno na aktivne biološke komponente preparata i time ubrzava gubitak njihove insekticidne vrednosti. Kod formulacija zasnovanih na *Bacillus thuringiensis* (*Bt*), sunčevo zračenje dovodi do degradacije i spora i kristalnih proteinskih toksina, pa se smanjenje efikasnosti ne ispoljava samo kroz pad vijabilnosti bakterijskih ćelija, već i kroz slabljenje biološke aktivnosti aktivne materije kao celine. Upravo zato se UV stabilnost danas smatra jednim od centralnih parametara kvaliteta i upotrebne vrednosti biolarvicidnih formulacija (Nascimento i sar., 2022; Jalali i Maghsoudi, 2024).

Problem fotolabilnosti je naročito izražen kod mikrobnih insekticida zato što su njihove aktivne komponente po prirodi osetljive na spoljašnje energetske uticaje. Analize razvoja *Bt* formulacija pokazuju da su, uprkos dugogodišnjem tehnološkom unapređivanju, UV zračenje, temperatura i druge abiotičke sile i dalje među glavnim ograničenjima njihove stabilnosti u primeni. U tom smislu, UV degradacija ne predstavlja samo fizičko-hemijski proces raspadanja preparata, već i funkcionalni gubitak biološke raspoloživosti toksina, skraćanje vremena delovanja i brže opadanje larvicidne aktivnosti nakon izlaganja sunčevoj svetlosti.

Značaj ovog problema jasno potvrđuju eksperimentalni podaci. U radu Jalali i Maghsoudi (2024), nezaštićena *Bt* formulacija zadržala je svega 31,25% vijabilnosti spora nakon 96 h UV izlaganja, dok je mikroenkapsulisana formulacija sa sumpornim kvantnim tačkama zadržala 57,77% vijabilnosti, uz istovremeno višu larvicidnu aktivnost; mortalitet larvi iznosio je 71,22% kod zaštićene formulacije, naspram 38,42% kod slobodne, nezaštićene formulacije. Ovi rezultati pokazuju da UV degradacija nije marginalan gubitak stabilnosti, već proces koji može gotovo prepoloviti očuvanje aktivne komponente i snažno umanjiti biološki učinak preparata ukoliko zaštitna matrica nije prisutna.

Sličan obrazac zabeležen je i kod drugih proteinskih insekticidnih sistema. Palma i sar. (2024) pokazali su da je izlaganje UV zračenju drastično povećalo LC_{50} vrednost prečišćenog Vip3Ag4 proteina, sa približno 28 ng/cm² na 518 ng/cm², što ukazuje na snažan pad insekticidne aktivnosti nakon fotodegradacije. Kada je isti protein bio inkapsuliran u ćelijskom sistemu *Bacillus megaterium*, zabeležena je umerena fotoprotekcija, ali je i dalje bilo jasno da UV zračenje direktno narušava biološku funkcionalnost proteinskih insekticidnih agenasa. Ovaj nalaz je metodološki važan jer potvrđuje da fotolabilnost nije ograničena samo na klasične *Bt* spora – kristal formulacije, već predstavlja širi problem za biološke insekticidne molekule i njihove nosače.

U praktičnom smislu, posledica UV degradacije nije samo kraće trajanje proizvoda na osvetljenoj površini, već i promena odnosa između nominalne i stvarno dostupne doze aktivne materije. To znači da formulacija može formalno sadržati dovoljnu količinu aktivnog agensa, ali da nakon izlaganja sunčevoj svetlosti raspoloživa koncentracija toksina i broj funkcionalnih mikrobnih jedinica brzo opadnu ispod nivoa potrebnog za pouzdan larvicidni efekat. Upravo zbog toga savremena formulaciona istraživanja teže da UV zaštitu posmatraju ne kao dodatni tehnološki bonus, već kao sastavni deo dizajna preparata. Nano-nosači, mikroenkapsulacija, Pickering emulzije, polimerne matrice i drugi sistemi kontrolisanog oslobađanja razvijaju se upravo sa ciljem da se umanji fotoliza, produži prisustvo aktivne materije i obezbedi stabilniji biološki odgovor tokom vremena.

Posebno je važno što savremeni pristupi UV zaštiti ne deluju isključivo pasivnim „zaklanjanjem” aktivne materije, već često istovremeno poboljšavaju i druge funkcionalne osobine formulacije. Wu i sar. (2025) pokazali su da su hitozanske Pickering mikroemulzije mikrokapsule, pored zaštite od UV zračenja, obezbedile i bolju suspenzionu stabilnost, održano oslobađanje aktivnih komponenti i produženo zadržavanje *Bt* u sredini pogodnoj za razvoj larvi komaraca. U istom pravcu, Zhao i sar. (2025) su pokazali da određene kombinacije đubriva i huminskih komponenti mogu podstaći formiranje biofilma i time povećati UV otpornost i insekticidnu aktivnost *Bt* vlaživih praškova (WP). Takvi rezultati pokazuju da fotostabilnost treba posmatrati kao deo šire funkcionalne arhitekture formulacije, a ne kao izolovanu osobinu jednog dodatka.

Shodno tome, UV zračenje se u razvoju biolarvicida sledeće generacije ne može tretirati samo kao spoljašnji stresor, već kao selekcionni kriterijum koji određuje koje formulacije imaju realan potencijal za efikasnu primenu. Preparat koji pokazuje visoku biološku aktivnost u odsustvu svetlosti, ali brzo gubi funkcionalnost pod UV opterećenjem, teško može zadovoljiti zahteve savremene terenske upotrebe. Zbog toga se dalji razvoj biolarvicida sve više usmerava ka formulacijama koje aktivni agens istovremeno štite, stabilizuju i postepeno oslobađaju, uz što manji ekološki trošak same zaštitne matrice. U tom okviru, održivi i unapređeni sistemi UV zaštite predstavljaju logičan sledeći korak u formulacionom razvoju i centralnu temu narednog poglavlja.

Održivi i unapređeni sistemi UV zaštite

Razvoj održivih sistema UV zaštite u formulaciji biolarvicida danas se zasniva na promeni samog formulacionog koncepta: umesto da se aktivnoj komponenti naknadno dodaje pojedinačni zaštitni aditiv, savremeni pristupi teže projektovanju nosača u kojima je fotoprotekcija ugrađena u samu arhitekturu preparata. Kako ističu Gallucci i sar. (2025), u agroformulacijama nove generacije održive *delivery* strategije sve se češće oslanjaju na biozasnovane i višefunkcionalne matrice koje istovremeno obezbeđuju fizičku stabilnost, kontrolisano oslobađanje i veću otpornost aktivne supstance na spoljašnje stresore. U tom

okviru, mikroenkapsulacija predstavlja jedan od centralnih pravaca razvoja, jer omogućava da se biološki aktivni agensi prostorno odvoji od spoljašnje sredine zaštitnim omotačem, pri čemu se istovremeno mogu regulisati stabilnost, disperzija i kinetika oslobađanja. Coelho i sar. (2025) pokazuju da je upravo enkapsulacija postala jedna od najvažnijih tehnoloških platformi za unapređenje bakterijskih i gljivičnih biopesticida, naročito kada je cilj očuvanje vijabilnosti i funkcionalnosti tokom skladištenja i primene. U tom smislu, zaštitna matrica nije samo fizička barijera, već aktivni deo formulacije koji određuje ponašanje preparata nakon aplikacije.

Posebno su značajne biopolimerne matrice zasnovane na polisaharidima, jer omogućavaju formiranje zaštitnih omotača uz manju potrebu za sintetičkim pomoćnim komponentama. Među njima se naročito izdvaja hitozan, koji zahvaljujući sposobnosti formiranja filmova, gelova, mikro- i nanočestica pruža široke mogućnosti za izradu formulacija sa poboljšanom stabilnošću i kontrolisanim oslobađanjem. Upravo zato se hitozan sve češće koristi kao osnovni strukturni element zaštitnih sistema za biološke agense, a ne samo kao pomoćni aditiv, jer može doprineti i stabilnosti disperzije i funkcionalnoj organizaciji aktivne komponente unutar formulacije (Coelho i sar., 2025).

Dalji tehnološki iskorak predstavljaju Pickering emulzioni sistemi, kod kojih se stabilnost interfejsa postiže čvrstim česticama, a ne konvencionalnim surfaktantima. Ovakva organizacija sistema je važna zato što omogućava robusniju strukturu nosača, finiju kontrolu raspodele aktivne komponente i stabilnije ponašanje formulacije tokom skladištenja i primene. Na primeru *Bacillus thuringiensis*, Wu i sar. (2025) su pokazali da hitozanske Pickering dvostruke emulzije mikrokapsule mogu istovremeno unaprediti UV stabilnost i perzistentnost preparata, čime potvrđuju da ovakvi sistemi imaju praktičnu vrednost u razvoju biolarvicida namenjenih realnim uslovima primene.

Pored polisaharidnih nosača, sve veći značaj dobijaju lignin i ligninski derivati, jer objedinjuju strukturnu i funkcionalnu ulogu u istoj formulaciji. Zahvaljujući aromatičnoj prirodi i prisustvu fenolnih grupa, lignin poseduje inherentna UV-apsorbirajuća i antioksidativna svojstva, zbog čega može doprineti zaštiti fotosenzitivnih aktivnih komponenti, a istovremeno ostati obnovljiv i biodegradabilan materijal. Meng i sar. (2025) upravo zato lignin-bazirane mikrokapsule izdvajaju kao perspektivnu platformu za pesticide, dok širi pregled funkcionalizacije lignina koji daju Ma i sar. (2025) pokazuje da se ovaj biopolimer sve više razvija kao aktivni materijal, a ne samo kao inertni nosač. Značajno je i to što se lignin danas retko posmatra izolovano. Savremeni formulacioni pristupi sve češće idu ka kompozitnim sistemima u kojima se lignin kombinuje sa drugim biopolimerima ili funkcionalnim česticama kako bi se istovremeno optimizovali mehanička stabilnost i oslobađanje aktivne materije. Takav pristup je važan jer omogućava da UV zaštita bude deo ukupne performanse formulacije, a ne zasebna osobina koja se naknadno dodaje preparatu (Meng i sar., 2025; Gallucci i sar., 2025).

Poseban pravac razvoja predstavljaju prirodni pigmenti i bioinspirisani fotoprotektivni agensi. U toj grupi melanin privlači naročitu pažnju, jer prema analizi Muñoz-Torres i sar. (2024) poseduje širokopojasnu apsorpciju UV zračenja i izražen fotoprotektivni potencijal, dok se istovremeno može posmatrati kao biološki kompatibilna i održiva komponenta zaštitnih sistema. Dodatno, pregled bioloških pigmenata koji daju Singh i sar. (2025) potvrđuje da melanin u mikroorganizmima ima važnu ulogu u odgovoru na UV stres, što ga čini posebno zanimljivim kandidatom za formulacije u kojima je potrebna kombinacija fotoprotekcije i biološke prihvatljivosti.

Ipak, pravac razvoja ne vodi ka traženju jednog univerzalnog zaštitnog materijala. Naprotiv, najperspektivniji sistemi danas su višekomponentni i hijerarhijski organizovani, tako da biopolimerna matrica obezbeđuje inkapsulaciju, pigmentna ili aromatična komponenta doprinosi fotoprotekciji, a strukturni elementi formulacije regulišu ponašanje preparata tokom skladištenja i nakon aplikacije. Zbog toga se koncept održive UV zaštite u biolarvicidima sve više udaljava od klasične formulacije sa „dodatkom zaštitnog sredstva” i prelazi ka integrisanom dizajnu funkcionalnih nosača, što Gallucci i sar. (2025) prepoznaju kao jedno od ključnih obeležja agroformulacija nove generacije.

U tom smislu, održivi i unapređeni sistemi UV zaštite ne predstavljaju samo tehničko poboljšanje postojećih preparata, već osnovu za razvoj biolarvicida kod kojih će formulaciona matrica imati jednako važnu ulogu kao i sam aktivni agens. Upravo na toj integraciji biološke aktivnosti, materijalne funkcionalnosti i ekološke prihvatljivosti zasniva se prelaz ka biolarvicidima sledeće generacije.

Biolarvicidi sledeće generacije: pravci razvoja i moguća rešenja

Prvi važan pravac razvoja odnosi se na širenje spektra aktivnih mikrobioloških agenasa izvan danas dominantnih sistema zasnovanih na *Bacillus thuringiensis* var. *israelensis* i *Lysinibacillus sphaericus*. Iako ovi agensi i dalje predstavljaju osnovu komercijalnih biolarvicida, Beltrán Pineda i sar. (2025) ukazuju da je oslanjanje na ograničen broj bakterijskih platformi dugoročno razvojno usko grlo, te da je neophodno intenzivirati istraživanja alternativnih entomopatogenih bakterija i njihovih metabolita. Slično tome, Hong i sar. (2025) naglašavaju da entomopatogene gljive, virusi i novi mikrobnii izolati predstavljaju važan rezervoar kandidata za razvoj novih larvicidnih proizvoda, naročito u kontekstu potrebe za većom biološkom raznovrsnošću aktivnih sistema.

Drugi pravac razvoja podrazumeva prelazak sa jednodokomponentnih preparata na multifunkcionalne formulacije u kojima se aktivni agens kombinuje sa komponentama koje unapređuju njegovu raspodelu, perzistentnost i dostupnost ciljnom organizmu. U toj logici, formulacija više nije samo nosač aktivne materije, već aktivni činilac ukupnog biološkog učinka. Hong i sar. (2025) posebno ističu značaj sinergističkih kombinacija mikroorganizama i drugih sredstava kontrole, jer takvi pristupi mogu povećati efikasnost i istovremeno doprineti usporavanju razvoja rezistencije. Ovakav razvojni pravac je važan i zato što

omogućava da se različiti mehanizmi delovanja objedine u jednoj strategiji, čime se povećava robusnost preparata u složenim uslovima primene.

Treći važan pravac jeste optimizacija same forme proizvoda za konkretne operativne scenarije. Podaci koje iznose Asgarian i sar. (2025) pokazuju da različite *Bt* formulacije ne daju iste rezultate u poluterenskim uslovima, pri čemu su vlaživi praškovi u njihovom istraživanju pokazali veću efikasnost i bolju rezidualnu aktivnost od granula i suspenzija. Ovakvi nalazi ukazuju da razvoj biolarvicida sledeće generacije mora biti usmeren i na izbor odgovarajuće formulacione forme za specifičan tip staništa, režim tretmana i logističke uslove primene. Drugim rečima, inovacija ne podrazumeva samo „novi sastav“, već i bolje usklađivanje proizvoda sa realnim obrascima upotrebe.

Posebno značajno rešenje za budući razvoj predstavlja lokalna i regionalna proizvodnja biolarvicida, jer ona može povećati dostupnost preparata, smanjiti troškove lanca snabdevanja i olakšati prilagođavanje proizvoda lokalnim potrebama. Primer velikih programa larvicidinga u Tanzaniji pokazuje da domaća proizvodnja bakterijskih biolarvicida može biti integrisana u šire javnozdravstvene programe, uz operativnu primenu u urbanim i ruralnim sredinama. Gavana i sar. (2025) ukazuju da ovakav model ima značaj ne samo sa tehnološkog, već i sa strateškog stanovišta, jer povezuje razvoj proizvoda sa kapacitetom sistema da ga kontinuirano koristi na terenu. U tom smislu, biolarvicidi sledeće generacije neće zavisiti samo od laboratorijske inovacije, već i od mogućnosti njihove pouzdane i ekonomski održive proizvodnje.

Četvrti pravac razvoja odnosi se na integraciju biolarvicida u šire sisteme upravljanja vektorima i štetnim insektima. Budući preparati moraće da budu projektovani tako da se mogu uklapati u kombinovane strategije koje uključuju monitoring larvalnih staništa, ciljano tretiranje, praćenje efikasnosti i prilagođavanje režima primene tokom vremena. Hong i sar. (2025) naglašavaju da dugoročna održivost biološke kontrole zavisi upravo od ovakvog integrisanog pristupa, jer izolovana upotreba pojedinačnog sredstva teško može odgovoriti na prostornu i vremensku heterogenost ciljnih populacija. Stoga se kao jedno od ključnih rešenja nameće razvoj biolarvicida koji su kompatibilni sa programima integralnog upravljanja, a ne samo efikasni u pojedinačnom bioeseju.

Peto, budući razvoj mora ozbiljno uključiti strategije upravljanja rezistencijom. Iako se biolarvicidi često posmatraju kao povoljnija alternativa sintetičkim insekticidima, njihova šira i dugotrajnija primena zahteva razmišljanje o očuvanju efikasnosti aktivnih agenasa kroz vreme. Hong i sar. (2025) ukazuju da kombinovanje različitih mikroorganizama ili mehanizama delovanja može doprineti smanjenju selekcionog pritiska, dok razvoj novih bakterijskih platformi, na koji ukazuju Beltrán Pineda i sar. (2025), otvara prostor za diverzifikaciju aktivnih osnova budućih proizvoda. Zbog toga se biolarvicidi sledeće generacije moraju razvijati ne samo kao efikasni, već i kao evolutivno održivi sistemi kontrole.

Najzad, jedan od centralnih pravaca razvoja odnosi se na pomeranje fokusa sa isključivo laboratorijske potvrde ka snažnijoj terenskoj i poluterenskoj

validaciji. Rezultati Asgarian i sar. (2025) jasno pokazuju da razlike među formulacijama postaju posebno vidljive upravo u uslovima koji bolje odražavaju realnu primenu, dok podaci Gavana i sar. (2025) potvrđuju da se operativna vrednost proizvoda mora procenjivati i u kontekstu programa velikih razmera. Iz tog razloga, moguća rešenja za budućnost ne treba tražiti samo u otkrivanju novih agenasa, već i u standardizovanijem prelazu od laboratorijskog testiranja ka polju, uz jasnije kriterijume za procenu rezidualnog delovanja, stabilnosti i praktične korisnosti preparata. Upravo na toj osnovi biolarvicidi sledeće generacije mogu postati pouzdaniji, primenljiviji i tehnološki zreliji alati savremene kontrole larvi.

ZAKLJUČAK

Biolarvicidi predstavljaju važnu komponentu savremenih strategija kontrole larvi, posebno u uslovima kada se od mera suzbijanja istovremeno očekuju visoka efikasnost, selektivnost i smanjen pritisak na životnu sredinu. Njihov značaj ne proizlazi samo iz mogućnosti da zamene deo konvencionalnih hemijskih larvicida, već i iz činjenice da omogućavaju preciznije, biološki usmerenije i održivije intervencije u okviru integrisanih programa kontrole. Međutim, dosadašnje iskustvo pokazuje da njihova praktična vrednost ne zavisi isključivo od inherentne aktivnosti mikroorganizma ili toksina, već u velikoj meri i od sposobnosti preparata da zadrži funkcionalnost u realnim uslovima primene.

Upravo se u tom kontekstu UV zračenje izdvaja kao jedan od ključnih ograničavajućih faktora. Fotodegradacija može značajno umanjiti stabilnost i biološku raspoloživost aktivnih komponenti, čime se skraćuje rezidualno delovanje i smanjuje pouzdanost biolarvicida nakon aplikacije. Zbog toga razvoj savremenih preparata sve više prevazilazi klasičan koncept biološkog agensa kao nosioca ukupne efikasnosti i uključuje formulacioni dizajn kao ravnopravan element uspeha proizvoda.

Održivi i unapređeni sistemi UV zaštite, zasnovani na mikroenkapsulaciji, biopolimernim matricama, lignin-baziranim nosačima i prirodnim fotoprotektivnim komponentama, otvaraju mogućnost da se biolarvicidi razvijaju kao tehnološki složeniji i funkcionalno pouzdaniji proizvodi. Na toj osnovi nastaje koncept biolarvicida sledeće generacije, u kome se biološka aktivnost, stabilnost, kontrolisano oslobađanje i ekološka prihvatljivost ne posmatraju odvojeno, već kao međusobno povezane osobine jedinstvene formulacije.

Dalji napredak u ovoj oblasti zavisice od uspešnog povezivanja mikrobiologije, tehnologije, terenske validacije i operativne primene. Samo takav integrisani pristup može omogućiti razvoj biolarvicida koji neće biti efikasni samo u laboratorijskim uslovima, već i dovoljno stabilni, primenljivi i održivi za širu upotrebu u savremenim programima kontrole larvi. U tom smislu, biolarvicidi sledeće generacije sa unapređenim sistemima UV zaštite predstavljaju jedan od najperspektivnijih pravaca daljeg razvoja održive kontrole vektora i drugih štetnih insekata.

Zahvalnica

Ovaj rad je nastao u okviru postdoktorskog projekta Z4-70157 *“Optimization of melanin production from fungi for enhanced UV protection in bioinsecticides based on Bacillus thuringiensis – MelPro-Bt”*, koji finansira Javna agencija za znanstvenoraziskovalnu in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije (ARIS).

LITERATURA

1. Anjaneyulu, B., Chauhan, V., Mittal, C., & Afshari, M. (2024). Innovative nanocarrier systems: A comprehensive exploration of recent developments in nano-biopesticide formulations. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12, 113693.
2. Asgarian, T. S., et al. (2025). Evaluating the larvicidal effect of *Bacillus thuringiensis* M-H-14 on *Aedes aegypti* larvae under laboratory and semi-field conditions. *Scientific Reports*.
3. Cai, P., Matus, C., Larrain, P., Basso, C., & Castañé, C. (2025). *Microbial biopesticides: A One Health perspective on benefits and risks in the Americas and Europe*. *One Health*, 20, 100983.
4. CDC. (2024). *Larval Source Management and Other Vector Control Interventions*. Centers for Disease Control and Prevention.
5. Coelho, C. C. de S., Silva, T. B. M., Lima, A. C. P., Mota, M. F. dos S., Cortes, M. V. de C. B., Manoel, E. A., Cavalcanti, E. d'A. C., Guimarães Freire, D. M., Freitas-Silva, O., & Cipolatti, E. P. (2025). The role of encapsulation in promoting fungi and bacteria as biopesticides: Insights from a bibliometric review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*, 61, 103802.
6. EFSA. (2025). *Environmental risk assessment of pesticides*. European Food Safety Authority.
7. EPA. (2025a). *What are biopesticides?* United States Environmental Protection Agency.
8. EPA. (2025b). *Biopesticides*. United States Environmental Protection Agency.
9. European Commission. (2024). *Guidance on the risk assessment of metabolites produced by microorganisms used in plant protection products*. European Commission, Directorate-General for Health and Food Safety.
10. FAO. (2018). *Manual on development and use of FAO and WHO specifications for pesticides: Section 9, Specification guidelines for microbial pesticides*. Food and Agriculture Organization of the United Nations / World Health Organization.
11. FAO. (2023). *Registration of microbials*. FAO Pesticide Registration Toolkit.
12. Gallucci, N., De Cristofaro, I., Krauss, I. R., D'Errico, G., & Paduano, L. (2025). Eco-sustainable delivery strategies to drive agriculture forward. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 77, 101917.
13. Gavana, T., et al. (2025). Laboratory efficacy of Bactivec® and Griselesf® against mosquito larvae. *Frontiers in Malaria*.
14. Hong, G., Yu, L., Ji, H., Cao, Y., He, Z., Liu, C., Xia, Y., & Peng, G. (2025). Microbiological control for mosquito larvae: Current progress and applications. *Virulence*, 16(1), 2569999.
15. Jalali, E., & Maghsoudi, S. (2024). Enhancing UV radiation protection of *Bacillus thuringiensis* formulations using sulfur quantum dots: Synthesis and efficacy evaluation. *Scientific Reports*, 14, 68595.
16. Kahar, N., Akbar, M. A., & Yusoff, N. A. (2025). The role of UV absorbers in preventing photo-degradation and increasing lifespan of pesticides. *Discover Environment*, 3, 320.
17. Karaoglan, B., et al. (2024). Microbial pesticides: challenges and future perspectives for risk assessment. *Environmental Sciences Europe*, 36, Article 118.
18. Ma, N., Zhang, H., Zhao, J., et al. (2025). The developments in modifying functionality of lignin and its composites. *International Journal of Biological Macromolecules*.
19. Mapua, S. A., et al. (2024). Empowering rural communities for effective larval source management: A small-scale field evaluation of a community-led larviciding approach to control malaria in south-eastern Tanzania. *International Journal for Parasitology: Parasites and Wildlife*, 25, 100947.

20. Mawcha, K. T., et al. (2025). Recent advances in biopesticide research and development for sustainable agriculture. *Journal of Xenobiotics*.
21. Meng, L., Liu, K., Yang, G., & Chen, J. (2025). Lignin-based microcapsule for pesticide delivery: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 331, 148393.
22. Msugupakulya, B. J., et al. (2024). Influence of larval growth and habitat shading on retreatment frequencies of biolarvicides against malaria vectors. *Scientific Reports*, 14, Article 51152.
23. Muñoz-Torres, P., Cárdenas-Ninasivincha, S., & Aguilar, Y. (2024). Exploring the agricultural applications of microbial melanin. *Microorganisms*, 12(7), 1352.
24. Nascimento, J. do, Polanczyk, R. A., & Tavares, W. S. (2022). Adoption of *Bacillus thuringiensis*-based biopesticides in agricultural systems and new approaches to improve their use in Brazil. *Crop Protection*, 157, 105954.
25. Palma, L., Ruiz de Escudero, I., Mañeru-Oria, F., Berry, C., & Caballero, P. (2024). UV protection and insecticidal activity of microencapsulated Vip3Ag4 protein in *Bacillus megaterium*. *Toxicon*, 244, 107807.
26. Papadopoulou, K. K., et al. (2025). Benefits and challenges of upcoming microbial plant protection products. *iScience*.
27. Rique, H. L., Melo-Santos, M. A. V., Guedes-Miranda, H. S., & Silva-Filha, M. H. N. L. (2024). Evaluation of a long-lasting microbial larvicide against *Culex quinquefasciatus* and *Aedes aegypti* under laboratory and a semi-field trial. *Parasites & Vectors*, 17, 465.
28. Singh, D., Sharma, A., et al. (2025). The amazing world of biological pigments: A review on sources, properties and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*.
29. Verma, M. L., Kumar, A., Chintagunta, A. D., Samudrala, P. J. K., Bardin, M., & Lichtfouse, E. (2024). Microbial production of biopesticides for sustainable agriculture. *Sustainability*, 16(17), 7496.
30. WHO. (1999). *Guideline specifications for bacterial larvicides for public health use*. World Health Organization.
31. WHO. (2024). *Dengue – global situation*. World Health Organization.
32. WHO. (2024). *Vector control*. World Health Organization.
33. WHO. (2025). *Dengue and severe dengue*. World Health Organization.
34. Wu, H., Du, X., Guo, X., Cai, J., Chen, H., Chen, C., Shi, Y., Zhang, Y., Pan, X., Guan, X., & Zhang, L. (2025). Chitosan-based Pickering double emulsion microcapsules improve the UV stability and the persistence of *Bacillus thuringiensis* on mosquito control. *Carbohydrate Polymers*, 356, 123842.
35. Zhao, F., Zhang, Y., Li, X., et al. (2025). Enhancing *Bacillus thuringiensis* performance: Fertilizer-driven improvements in biofilm formation, UV protection, and pest control efficacy. *Microorganisms*, 13(3), 499.