



СРПСКА АКАДЕМИЈА НАУКА И УМЕТНОСТИ

ЕКОЛОШКИ И ЕКОНОМСКИ ЗНАЧАЈ ФАУНЕ СРБИЈЕ



ЕКОЛОШКИ И ЕКОНОМСКИ
ЗНАЧАЈ ФАУНЕ СРБИЈЕ

SERBIAN ACADEMY OF SCIENCES AND ARTS

SCIENTIFIC MEETINGS
Book CLXXI

DEPARTMENT OF CHEMICAL AND BIOLOGICAL SCIENCES
Book 12

ECOLOGICAL AND
ECONOMIC SIGNIFICANCE
OF FAUNA OF SERBIA

PROCEEDINGS OF THE SCIENTIFIC MEETING
held on November 17, 2016

E d i t o r
Corresponding Member
RADMILA PETANOVIĆ

BELGRADE 2018

СРПСКА АКАДЕМИЈА НАУКА И УМЕТНОСТИ

НАУЧНИ СКУПОВИ
Књига CLXXI

ОДЕЉЕЊЕ ХЕМИЈСКИХ И БИОЛОШКИХ НАУКА
Књига 12

ЕКОЛОШКИ И ЕКОНОМСКИ ЗНАЧАЈ ФАУНЕ СРБИЈЕ

ЗБОРНИК РАДОВА СА НАУЧНОГ СКУПА
одржаног 17. новембра 2016.

Уредник
дописни члан
РАДМИЛА ПЕТАНОВИЋ

БЕОГРАД 2018

Издаје
Српска академија наука и уметности
Београд, Кнез Михаилова 35

Лектура и коректура
Тања Рончевић

Прелом и дизајн корица
Никола Стевановић

Технички уредник
Мира Зебић

Тираж 400 примерака

Штампа
Colorgrafx, Београд

Српска академија наука и уметности © 2018

САДРЖАЈ
CONTENTS

Предговор	9
Preface	13
Александар Ћетковић, Владимир Стевановић ОЧУВАЊЕ И ВРЕДНОВАЊЕ БИОДИВЕРЗИТЕТА: КОНЦЕПТ ЕКОСИСТЕМСКИХ УСЛУГА И БИОЛОШКИ РЕСУРСИ ФАУНЕ	17
Aleksandar Ćetković, Vladimir Stevanović PRESERVATION AND EVALUATION OF BIODIVERSITY: THE CONCEPT OF ECOSYSTEM SERVICES AND BIOLOGICAL RESOURCES OF FAUNA	36
Душко Ћировић, Срђан Стаменковић ФАУНА СИСАРА СРБИЈЕ – ВРЕДНОВАЊЕ ФУНКЦИОНАЛНЕ УЛОГЕ И ЗНАЧАЈА ВРСТА У ЕКОСИСТЕМИМА	39
Duško Ćirović, Srđan Stamenković MAMMALS FAUNA OF SERBIA – VALORISATION OF FUNCTIONAL ROLE AND SPECIES IMPORTANCE IN ECOSYSTEMS	62
Воислав Васић О ВАЖНОСТИ ПТИЦА: ПРИМЕРИ ЕГЗИСТЕНЦИЈАЛНЕ ВРЕДНОСТИ И ПРАКТИЧНОГ ЗНАЧАЈА У СРБИЈИ	67
Voislav Vasić ON THE IMPORTANCE OF BIRDS: EXAMPLES OF THE EXISTENTIAL VALUE AND PRACTICAL SIGNIFICANCE OF THE BIRDS IN SERBIA	100

Имре Кризманић, Тања Вуков ВОДОЗЕМЦИ У СРБИЈИ ДАНАС И СУТРА – ЕКОЛОШКИ И ЕКОНОМСКИ ЗНАЧАЈ	103
Imre Krizmanić, Tanja Vukov AMPHIBIANS IN SERBIA TODAY AND TOMORROW – ECOLOGICAL AND ECONOMIC VALUE	138
Мирјана Ленхардт, Весна Ђикановић, Александар Хегедиш, Жељка Вишњић-Јефтић, Стефан Скорић, Марија Смедеревац-Лалић КВАЛИТАТИВНО-КВАНТИТАТИВНЕ ПРОМЕНЕ ИХТИОФАУНЕ У ПРОТОЧНИМ ДУНАВСКИМ АКУМУЛАЦИЈАМА ПОСЛЕ ИЗГРАДЊЕ БРАНА ЂЕРДАПСКИХ ХИДРОЕЛЕКТРАНА	143
Mirjana Lenhardt, Vesna Đikanović, Aleksandar Hegediš, Željka Višnjić-Jeftić, Stefan Skorić, Marija Smederevac-Lalić QUALITATIVE AND QUANTITATIVE CHANGES IN THE ICHTHYOFAUNA OF THE DANUBIAN RESERVOIRS AFTER THE CONSTRUCTION OF THE IRON GATES HYDROPOWER PLANT DAMS	168
Зоран Марковић, Марко Станковић, Божидар Рашковић, Ненад Секулић, Весна Полексић АКВАКУЛТУРА У СЛУЖБИ ЗАШТИТЕ УГРОЖЕНИХ ВРСТА РИБА У СРБИЈИ	173
Zoran Marković, Marko Stanković, Božidar Rašković, Nenad Sekulić, Vesna Poleksić AQUACULTURE IN SERVICE OF EDANGERED FISH SPECIES PROTECTION IN SERBIA	195
Ивана Живић, Александар Остојић, Бранко Миљановић, Зоран Марковић МАКРОИНВЕРТЕБРАТЕ ТЕКУЋИХ ВОДА СРБИЈЕ И ЊИХОВ БИОИНДИКАТОРСКИ ЗНАЧАЈ У ПРОЦЕНИ КВАЛИТЕТА ВОДЕ	199
Ivana Živić, Aleksandar Ostojić, Branko Miljanović, Zoran Marković MACROINVERTEBRATES OF SERBIAN STREAMS AND THEIR SIGNIFICANCE AS BIOINDICATORS IN ESTIMATION OF WATER QUALITY	226

Дејан Пантелић, Срећко Ђурчић, Александар Крмпот, Дејан В. Стојановић, Михаило Рабасовић, Светлана Савић-Шевић МОРФОЛОШКЕ СТРУКТУРЕ НЕКИХ ПРЕДСТАВНИКА ЕНТОМОФАУНЕ СРБИЈЕ КАО МОДЕЛИ У БИОМИМЕТИЦИ	231
Dejan Pantelić, Srećko Ćurčić, Aleksandar Krmpot, Dejan V. Stojanović, Mihailo Rabasović, Svetlana Savić-Šević THE MORPHOLOGICAL STRUCTURES OF SOME REPRESENTATIVES OF THE ENTOMOFAUNA OF SERBIA AS MODELS IN BIOMIMETICS	250
Михаела Кавран, Александра Игњатовић Ђупина, Марија Згомба, Душан Петрић ЈЕСТИВИ ИНСЕКТИ – БЕЗБЕДНА ХРАНА ЗА ЉУДЕ И ДОМАЋЕ ЖИВОТИЊЕ	251
Mihaela Kavran, Aleksandra Ignjatović Ćupina, Marija Zgomba, Dušan Petrić EDIBLE INSECTS – SAFE FOOD FOR HUMANS AND LIVESTOCK	295
Жељко Томановић, Владимир Жикић КОМПЛЕКСИ БРАКОНИДНИХ ОСА (HYMENOPTERA, ICHNEUMONOIDEA, BRACONIDAE) У СРБИЈИ И ЊИХОВ ЗНАЧАЈ У БИОЛОШКОЈ КОНТРОЛИ	301
Željko Tomanović, Vladimir Žikić BRACONID COMPLEXES (HYMENOPTERA, ICHNEUMONOIDEA, BRACONIDAE) IN SERBIA; THE IMPORTANCE IN BIOLOGICAL CONTROL	308
Љубодраг Михајловић ЕКОЛОШКИ И ЕКОНОМСКИ ЗНАЧАЈ ФАУНЕ НАДФАМИЛИЈЕ CHALCIDOIDEA СРБИЈЕ (INSECTA:HYMENOPTERA)	313
Ljubodrag Mihajlović ENVIRONMENTAL AND ECONOMIC SIGNIFICANCE OF ZOOLOGY OF THE SUPERFAMILIA CHALCIDOIDEA IN SERBIA (INSECTA: HYMENOPTERA)	337

Иво Тошевски, Оливер Крстић, Јелена Јовић, Биљана Видовић, Радмила Петановић ИНСЕКТИ И ГРИЊЕ У ФАУНИ СРБИЈЕ ОД ЗНАЧАЈА ЗА КЛАСИЧНУ БИОЛОШКУ КОНТРОЛУ КОРОВА	341
Ivo Toševski, Oliver Krstić, Jelena Jović, Biljana Vidović, Radmila Petanović INSECTS AND MITES IN THE FAUNA OF SERBIA – IMPORTANCE FOR THE CLASSICAL BIOLOGICAL CONTROL OF WEEDS	363
Љубиша Станисављевић, Анте Вујић, Предраг Јакшић, Злата Марков, Александар Ћетковић ФУНКЦИОНАЛНО-ЕКОЛОШКИ СТАТУС, УГРОЖЕНОСТ И ЕКОНОМСКО ВРЕДНОВАЊЕ ИНСЕКТА ОПРАШИВАЧА У СРБИЈИ	367
Ljubiša Stanisavljević, Ante Vujić, Predrag Jakšić, Zlata Markov, Aleksandar Ćetković FUNCTIONAL AND ECOLOGICAL STATUS, VULNERABILITY AND ECONOMIC EVALUATION OF INSECT POLLINATORS IN SERBIA	411

ПРЕДГОВОР

Тематски скуп о еколошком и економском значају фауне Србије, који је иницирао Академијски одбор за проучавање фауне Србије САНУ, одржан је у јубиларној години обележавања 175. годишњице САНУ, 17. новембра 2016. године.

Откада је појам **биодиверзитета** званично ушао у употребу 1992. године доношењем Конвенције о биолошкој разноврсности а потом и њеном ратификацијом којом су све државе потписнице преузеле **обавезу** да донесу законска акта и успоставе потребне активности на **заштити и вредновању** биодиверзитета, истраживања флоре, фауне и фунгије добила су на значају, а класичне биолошке дисциплине – таксономија, биогеографија и екологија – нашле су се у жижи интересовања не само научне већ и шире јавности. Таксономија, систематика и фаунистика, односно флористика, традиционалне биолошке дисциплине са најдужом традицијом у биологији, доживеле су свој препород или тријумфални повратак.

Важно је истаћи да је Српска академија наука и уметности, од свог оснивања, препознала значај изучавања живог света Србије и околних земаља и да је увидела да је повратак ових биолошких дисциплина важан задатак биолога у Србији на почетку новог миленијума. Два Академијска одбора, Одбор за изучавање флоре и вегетације и Одбор за проучавање фауне Србије, покренула су и остварила капитална дела флористике, фитоценологије и фаунистике у Србији. Едиција Флоре Србије доживљава друго, ново и значајно измењено издање, објављују се нови прилози у едицији Вегетација Србије, а едиција Фауна Србије већ има неколико вредних монографија: *Фауна мрава Србије*, *Крпељи Србије*, *Репати водоземци Србије*. Овим публикацијама САНУ се представила као најрелевантнија институција у Србији, фокусирана, преко одбора, на истраживања флоре и фауне, што имплицира свеобухватно сагледавање биодиверзитета у Србији.

Одржани научни скупови посвећени, директно или индиректно овој проблематици додатно потврђују спремност и разумевање САНУ да

истраживања флоре и фауне, као и биодиверзитета Србије, одлучно подржи. У том контексту би требало и разумети овај научни скуп.

Примена Конвенције о биолошкој разноврсности и њених полазних идеја и концепција временом је довела до разраде, унапређивања и усредсређивања на неке друге аспекте очувања и коришћења биодиверзитета, а не само његове вредности као више или мање обновљивог ресурса, већ и читавих екосистема, односно до функционалности њихових кључних компоненти или процеса који омогућавају корист и добробит за било коју људску заједницу. То је остварено дефинисањем **екосистемских услуга** као **кључног теоријског приступа и практичног механизма** за свеобухватно **вредновање** реалног значаја очувања биодиверзитета.

Подсетићемо се овим приликом да је 2005. године у организацији Одбора „Човек и животна средина“ Српске академије наука и уметности, одржан научни скуп „**Биодиверзитет на почетку новог миленијума**“ који је **сумирао фундаменталне теме** које се тичу биодиверзитета, развоја идеје о потреби заштите и парадигми одрживости са циљем да пружи одговоре на значајна питања: колико је у нашем друштву порасла свест о потреби заштите биодиверзитета; шта је у међувремену урађено на плану инвентаризације биодиверзитета и колики су трошкови заштите биодиверзитета, односно који су економски модалитети потребни за остваривање склада између заштите биодиверзитета и коришћења биолошких ресурса.

Научни скуп „Еколошки и економски значај фауне Србије“ комплементаран је, у извесној мери, наведеном, и надовезује се темама које обрађује на неке аспекте очувања и заштите биодиверзитета, примарно на **вредновање** фауне Србије као елемената биодиверзитета у функцији **биолошких ресурса**, али и у складу са савременим приступом о **екосистемским услугама биодиверзитета** пре свега у доменима „снабдевања/обезбеђивања“ и регулације, али и „културних“ вредности/добара.

Сви научни радови, у Зборнику, подвлаче циљеве научног скупа, одржаног 17. новембра 2016. године:

- сагледавање напретка који је постигнут разрадом концепата из Конвенције и доношењем допунских стратешких докумената чији је циљ да олакшају комплексне задатке очувања биодиверзитета и коришћења биолошких ресурса, генерално, а посебно у Србији, као и да се укаже на неодрживу праксу експлоатације и недовољне бриге о ресурсима фауне;
- сагледавање функционалне улоге и значаја припадника фауне Србије и указивање на њихове вредности у контексту новоуспостављеног концепта **екосистемских услуга** пре свега као биоиндикатора загађења средине, те илустративних и инспиративних примера у биомиметици и биофизици, као чинилаца биолошке контроле штет-

них организама, опрашивања биљака или као елемената естетске и других нематеријалних вредности, у различитим доменима људске егзистенције и делатности у Србији;

- сагледавање значаја које поједине врсте или фаунистичке групе имају као ресурси хранљивих и лековитих супстанци и других, за човека корисних и употребљивих својстава.

Очекујемо да ће резултати анализа у Зборнику са научног скупа „Еколошки и економски значај фауне Србије“, допринети планирању пројеката вредновања и очувања биодиверзитета, процени угрожености и заштити фауне Србије, као и одрживом коришћењу биолошких ресурса фауне и омогућити сагледавање садашњег стања у националној легислативи и активностима надлежних сектора и однос заједнице према живом свету као природној баштини у Србији данас. Очекујемо да ће се истаћи и економски значај, односно вредновање појединих таксона животиња, не само у контексту биолошких ресурса, већ вредности њихове улоге у склопу екосистемских услуга које пружају, а уколико не постоје одговарајући подаци у Србији, да се процене могу извести на основу аналогних података из других земаља, са циљем очувања биодиверзитета Србије.

У Београду, 17. јануара 2018. године

Радмила Петановић, дописни члан

PREFACE

The thematic conference on ecological and economic importance of Serbian fauna, initiated by the SASA Academic committee for the study of the fauna of Serbia, was held in the jubilee year of marking the 175 years of SASA, on 17th November 2016.

Since the term biodiversity was officially put into use in 1992, with the Convention on Biological Diversity entering into force and its later ratification which led to all signatory states taking the obligation to impose legal acts and establish necessary activities regarding the protection and evaluation of biodiversity, the exploration of flora, fauna and fungi gained importance while classical biological disciplines such as taxonomy, biogeography and ecology were placed in the focus of not only scientific, but also wider public. Taxonomy, systematics and faunistics, i.e. floristics, traditional biological disciplines with the longest tradition in biology, have witnessed their rebirth and triumphal return.

It is important to highlight that the Serbian Academy of Sciences and Arts since its inception has recognized the importance of studying the living world of Serbia and surrounding countries, and that the return of these biological disciplines is an important task for Serbian biologists at the beginning of the new millennium.

Two Academic committees, the Academic committee for the study of flora and vegetation and the Academic committee for the study of the fauna of Serbia, have initiated and accomplished capital works in the field of floristics, phytocoenology and faunistics in Serbia.

The publication *Flora of Serbia* has had a new, second and significantly revised edition, new contributions within the edition *Vegetation of Serbia* have been published, and the edition *Fauna of Serbia* has already got several valuable monographs – the *Ant Fauna of Serbia*, *Ticks of Serbia*, *Tailed Amphibians of Serbia*. These publications show that SASA, through its committees, is like few institutions in Serbia, centered on the exploration of flora and fauna, which can ultimately be classified as an inevitable and comprehensive view on biodiversity in Serbia. The previous scientific conferences directly or indirectly

dedicated to this subject, additionally confirm the readiness and understanding of SASA to offer its strong support to the exploration of flora and fauna, as well as the biodiversity of Serbia. This scientific conference should also be understood through such context.

The application of the Convention on Biological Diversity and its initial ideas and conceptions, eventually led to the elaboration, improvement and focusing on some other aspects of conservation and use of biodiversity, not only its value as a more or less renewable resource, but also the whole ecosystems, i.e. the functionality of their key components or processes which provide benefit and well-being to any human community. This was accomplished by defining ecosystem services as a key theoretical approach and practical mechanism for comprehensive evaluation of the real importance of biodiversity conservation.

On this occasion, we would like to bring to mind the scientific conference “Biodiversity at the onset of a new millennium” held in 2005, organized by the “Man and Environment” Committee of SASA, summing up fundamental issues regarding biodiversity, development of the idea on the need of protection and paradigm of sustainability with the aim to offer answers to questions such as:

- how much has the awareness on the need of biodiversity preservation been developed in our society;
- what has been done about the plan of inventory of biodiversity in the meantime;
- and how big the expenses of protecting biodiversity are, i.e. which economic modalities are necessary for achieving harmony between the protection of biodiversity and the use of biological resources.

The scientific conference “Ecological and economic importance of Serbian fauna” is somewhat complementary to the above mentioned conference, with the areas of interest it explores, building on certain aspects of conservation and protection of biodiversity, above all the evaluation of fauna of Serbia as an element of biodiversity in the function of biological resources, and in accordance with the contemporary approach to ecosystem services of biodiversity, primarily in the domain of “supplying/providing” and regulation, but also “cultural” values/goods.

The aim of this scientific conference and the scientific papers to be published in the Proceedings is to enable:

- perceiving the progress made by elaborating concepts from the Convention and imposing additional strategic documents aimed at facilitating complex tasks of preserving biodiversity and using biological resources in general, especially in Serbia, as well as indicating the unsustainable exploitation practice and insufficient care for the resources of fauna;

- perceiving the functional role and importance of the members of Serbian fauna and indicating their values in the context of the newly established concept of ecosystem services, primarily as bioindicators of environmental pollution, as illustrative and inspirational examples in biomimetics and biophysics, as factors of biological control over harmful organisms, plant pollination or elements of esthetic and other immaterial values, in various domains of human existence and activity in Serbia;
- perceiving the importance that certain species or faunistic groups have as resources of nutritive and healing substances and other useful and usable properties to people.

We expect that the results of analysis, published in the Proceedings from the scientific conference “Ecological and economic significance of Fauna of Serbia”, will be useful for planning the projects of evaluating and preserving biodiversity, assessing the endangerment and protection of Serbian fauna, as well as sustainable use of biological resources of fauna, and that we will be able to perceive the current situation in national legislation and activities, along with the attitude of the community towards the living world as a natural heritage in Serbia today. We also expect to draw attention to the economic significance, i.e. the evaluation of certain animal taxa, not only in the context of biological resources but also the value of their role within the ecosystem services they offer, and if there are no sufficient data in Serbia, that assessments based upon corresponding data from other countries will be made, all in order to preserve the biodiversity of Serbia.

Belgrade, 17th January 2018

Radmila Petanović, corresponding member

МОРФОЛОШКЕ СТРУКТУРЕ НЕКИХ ПРЕДСТАВНИКА ЕНТОМОФАУНЕ СРБИЈЕ КАО МОДЕЛИ У БИОМИМЕТИЦИ

Дејан ПАНТЕЛИЋ*, Срећко ЋУРЧИЋ**, Александар КРМПОТ*, Дејан В.
СТОЈАНОВИЋ***, Михаило РАБАСОВИЋ*, Светлана САВИЋ-ШЕВИЋ*

С а ж е т а к. – Током веома дугог еволутивног развоја живи организми су развили добро адаптиране материјале и структуре који представљају напредна решења у области оптике, механике, термике или акустике, чак и са аспекта модерне науке, што је довело до интензивног развоја биомиметике као области која се бави стварањем нових технологија инспирисаних биолошким макроструктурама и микроструктурама. Код већег броја таксона лептира и тврдокрилаца, елемената фауне Србије, примећује се структурна обојеност њихових крила и покрилаца. Она настаје због присуства низа наизменичних ваздушних и хитинских слојева кутикуле (нпр. ребра, ламеле и гребени на љуспицама крила лептира), на којима се испољава таласна природа светлости кроз појаве интерференције, дифракције и расејања. При томе долази до селективне рефлексije светлосних таласа и појаве структурних боја. Овде су представљене методе генерисања биоморфних структура применом холографије, микролитиграфије и сродних оптичких техника. Указано је на могућности практичне примене морфолошких структура појединих врста инсеката из Србије у области сензора, заштите докумената и нових оптичких материјала.

Кључне речи: биофотоника, биомиметика, инсекти, структурне боје

* Институт за физику, Универзитет у Београду, pantelic@ipb.ac.rs, krmpot@ipb.ac.rs, rabasovic@ipb.ac.rs, svetlana.savic@ipb.ac.rs

** Институт за зоологију, Универзитет у Београду – Биолошки факултет, srecko@bio.bg.ac.rs

*** Институт за низијско шумарство и животну средину, Универзитет у Новом Саду, dvstojanovic@uns.ac.rs

УВОД

Природа је одувек била инспирација обичном човеку, уметнику или научнику. Сетимо се Ван Гогових пејзажа, слике са цветовима ириса или вазе са сунцокретима. Поменимо и писца научне фантастике Станислава Лема и његов роман „Непобедиви“, у коме ројеви минијатурних, летећих, инсектоликих робота, на далекој планети, нападају моћну интергалактичку крстарицу, исказујући своју колективну интелигенцију. Роман је превазишао уметност и имао је утицај на развој концепта „паметне прашине“ (енгл. smart dust) [1] као система бежично повезаних сензора.

И многе друге идеје, открића и проналасци су произашли из посматрања природе. Ото Лилијентал је објавио књигу „Лет птица као основа вештине летења“ [2] и конструисао низ летећих машина инспирисаних птицама. Протезе спринтера Оскара Писторијуса, конструисане од композита са угљеничним влакнима, акумулирају механичку енергију и имају велику сличност са ногама кенгура. Поменимо и проналазача Жоржа де Местрала и његову чичак траку, чије само име указује на извор инспирације. Многе рачунарске и алгоритамске технике, попут целуларних аутомата [3], неуронских мрежа, еволуционих и генетских алгоритама, интелигенције роја [4] „позајмљене“ су из природе.

Тешко је одредити тачан историјски тренутак када је посматрање и имитирање природе претворено у посебну научну област. Пре ће бити да је целокупни развој цивилизације у доброј мери био везан за учење од природе, да би данас овај правац истраживања добио назив биомиметика. Њен циљ је да се посматрањем организама и биолошких система открију потенцијално корисне особине или „инжењерско-технолошка“ решења, која ће се затим копирати. Као пример ћемо навести сложене очи зглавкара, које имају веома широк видни угао, за разлику од стандардних оптичких система. Иако постоје панорамски објективи и технике панорамског снимања и међусобног повезивања слика, опрема је скупа, процедура компликована, а процес снимања је дуготрајан. Насупрот томе, еволуција је код већине зглавкара проблем решила на једноставан и ефикасан начин: уместо једног компликованог система, употребила је мноштво малих и једноставних (оматидије као делови сложеног ока) [5].

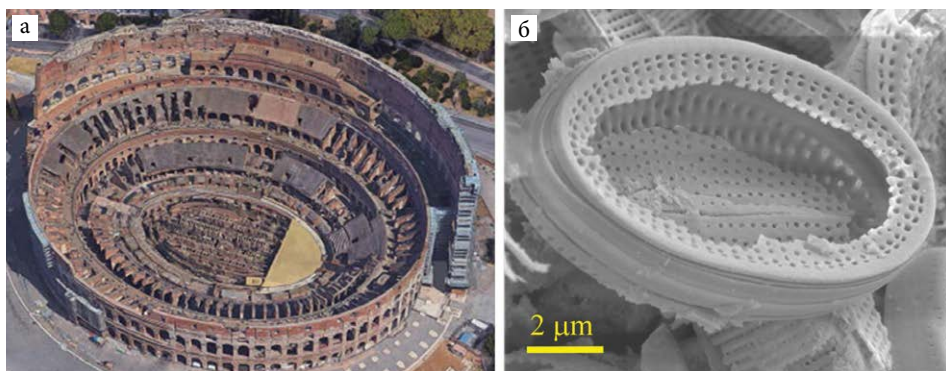
Сродна биомиметици је бионика, која означава инжењерски приступ имитацији природе, где није битно само разоткрити принципе функционисања живих организама, већ на ефикасан начин конструисати и направити производ. Као пример, наведимо фабрикацију материјала са суперхидрофобним својствима (способних да их не кваси вода). Одавно се зна да кутикула инсеката и површина листа лотоса одбијају воду [6], те да кожа ајкуле значајно смањује хидродинамички отпор [7]. У оба случаја, површина тела организама је покривена микронским и субмикронским избочинама, чиме се значајно мењају хидростатичке и хидродинамичке особине. Користећи ове принципе,

развијена је једноставна техника која користи савремени композитни материјал (полимер и угљеничне нанотубе) да рационално произведе суперхидрофобну површину [8].

Биомиметика понекад произлази из физичких услова који се постављају пред сложене системе, независно од тога да ли их је „конструисала“ природа или их је конструисао човек. Погледајмо само велику сличност између архитектуре римског Колосеума и „архитектуре“ дијатоме (сл. 1(а) и 1(б)). Као што је констатовано у раду [9], механичка отпорност фрустуле дијатома је веома добра, те се предлаже директно копирање биолошке механичке конструкције у архитектонску.

Често се среће и термин биоинспирација [10, 11], са прилично магловитом разликом у односу на биомиметику. Можда би се могло рећи да је то област којој биолошки системи служе само као полазна тачка за конципирање нових материјала, машина или уређаја. Не тежи се детаљном копирању биолошких функција, већ се неке од њих задржавају, а друге изостављају, са циљем задржавања жељене функције, уз могућност техничке реализације савременим технологијама. Истраживања сложеног ока рака *Odontodactylus scyllarus* (Linnaeus, 1758) показала су супериорна поларизациона својства у односу на савремене оптичке елементе овог типа [12]. У том смислу, ово је биоинспиративни путоказ за конструкцију нових оптичких компонената, као и других вештачких материјала, наравно, модерним технологијама.

На крају, један од интересантних праваца представља и функционализација биолошких структура или структура биолошког порекла. Овде се директно користе организми или њихови делови, који се затим модификује тако да раде ствари за које нису предвиђени својом биолошком природом. Занимљив је пример раније употребе (у XIX веку) нити паукове мреже као кончанице у окуларима оптичких инструмената и нишанских справа [13]. Све до појаве микролитиграфије, то је био једини начин да се у оптичке инструменте уграде веома fine нишанске линије, у распону дебљина од 2 до 10 μm (што је особина нити мреже паука крсташа –*Araneus diadematus* (Clerck, 1757)).



Слика 1. Сличност архитектуре (а) римског Колосеума и (б) дијатоме

Биомиметика, бионика, биоинспирација или функционализација нису термини којима се описује једна, добро дефинисана, област истраживања. У зависности који се аспект посматра, можемо бити инспирисани механиком, оптиком, термиком, трибологијом, адхезијом, акустиком, радиометријом, али и хемијом, организацијом или структуром. Истраживања су стога увек мултидисциплинарна, одређена знањем, искуством и интересовањем истраживача који их спроводе. Ми ћемо у овом раду приказати оне аспекте биомиметике који се тичу оптичких ефеката у живом свету [14] и могућности њихове практичне примене.

ИНСЕКТИ КАО ИНСПИРАЦИЈА У БИОФОТНИЦИ И БИОМИМЕТИЦИ

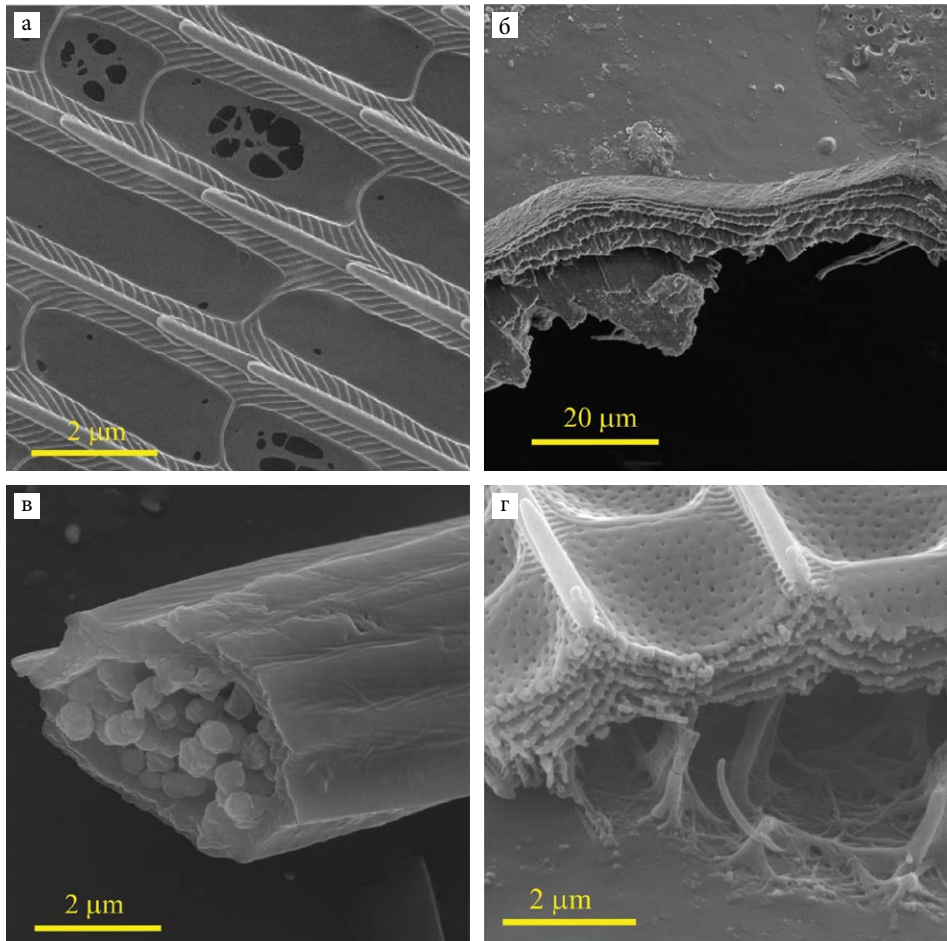
Инсекти су једна од најбројнијих група живих организама. Настајују скоро све екосистеме, а током еволуције су се развили различити механизми опстанка код бројних врста. Између осталог, на телу одређених инсеката се могу наћи зупчаник (*Issus coleopratus* (Fabricius, 1781) [15]), супер хидрофобне (*Morpho aega* (Hübner, 1822) [16]) и адхезивне структуре [17], као и сложене очи [18, 19].

Зато је поље биомиметике инсеката широко отворено за откривање нових принципа и њихово практично коришћење. Посебно је интересантна оптика, где постоји велики број студија заснованих на структурама инсеката – нпр. површински појачано Раманово расејање (енгл. surface-enhanced Raman scattering (SERS)), као метод детекције ниске концентрације анализата [20], љуспице крила лептира као сензори (*Euploea mulciber* (Cramer, 1777) [21], *Morpho sulkowskyi* (Kollar, 1850) [22]), инсектима инспирисани оптички филтери у заштити докумената (*Pierella luna* (Fabricius, 1793) [23]), радијативно хлађење (*Cataglyphis bombycina* Roger, 1850 [24]), ефикасни детектори инфрацрвеног зрачења (*Merimna atrata* (Gory & Laporte, 1837) [25], *M. sulkowskyi* [26]), итд.

Оптика кутикуле инсеката

Да би се добро разумела оптика инсеката, посветићемо ово кратко потглавље ефектима који постоје на њиховој кутикули. Основна намена им је да инсекту дају карактеристично обојење које му омогућава мимикрију, апосемију, дисруптивне ефекте (привидну промену контуре тела), што као последицу има ефикасније преживљавање у природном окружењу.

Са оптичке тачке гледишта, највише је заступљена апсорпција на различитим пигментима, попут меланина, птерина или каротеноида (пигментна обојеност) [27]. Дијапазон боја, који се на овај начин добија, је релативно ограничен, па је природа морала да посегне за напреднијим оптичким ме-



Слика 2. Примери (а) површинске (*Argynnis adippe* (Denis & Schiffermüller, 1775)) и (б) слојевите структуре кутикуле инсеката (*Calosoma sycophanta* (Linnaeus, 1758)), (в) запреминске структуре длачица (*Agapanthia violacea* (Fabricius, 1775)) и (г) мешовите површинско-запреминске структуре (*Jordanita globulariae* (Hübner, 1793))

ханизмима, као што су интерференција, расејање, поларизација, дифракција, преламање и таласоводна пропација. Већина поменутих ефеката се ослања на таласне особине светлости, што се у крајњем исходу своди на селективну рефлексију појединих спектралних интервала, чиме се постиже неопходна обојеност. Код инсеката се на овакав начин добијају боје из плавог и зеленог дела спектра, као и златне и сребрне боје. Занимљиво је да се код многих инсеката боје мењају са углом посматрања – ова појава се назива иридесценција.

Сви ови ефекти се виде само онда када је кутикула структурирана на микронском и субмикронском нивоу. Уочавају се паралелне линије (које

функционишу као дифракционе решетке – сл. 2(а)), слојевите структуре (сл. 2(б)), правилни (сл. 2(в)), комплексни (сл. 2(г)), запремински облици (фотонски кристали), низови брадавичастих испупчења, храпаве, неправилне површине, и све то у невероватном броју међусобних комбинација. Ове структуре се могу налазити у дубини кутикуле, као што је то најчешће случај код *Coleoptera*, или на љуспицама и длачицама које облажу кутикулу код *Lepidoptera* или неких *Coleoptera*. Боје настале на овакав начин (нпр. код лептира са сл. 3) називамо структурним.

Понекад морфолошке структуре немају улогу у стварању обојења, већ служе као помоћна компонента у смањивању губитака у оптичком систему ока. Велики број инсеката користи правилне структуре на површини корнее оматидија, које тада функционишу као антирефлексионни слој, који обезбеђује да највећи део светлосне енергије стигне до фоторецептора (кућна мува [28]).



Слика 3. Структурна обојеност крила лептира *Apatura metis* (Freyer, 1829).
На левом предњем крилу се види иридесцентна љубичаста боја,
која мења своју нијансу са променом угла посматрања

Кратак преглед техника анализе оптичких структура инсеката

Биомиметика суштински има два дела. Први се бави анализом природних структура, мерењем њихових оптичких особина (спектар, усмереност, поларизација) и разоткривањем физичких принципа који стоје иза примећених ефеката. Други покушава да искористи постојеће технологије ради имитације поменутих структура и ефеката.

С обзиром на минијатурност структура које се посматрају, најважније су микроскопске методе анализе: скенирајућа (SEM) и трансми-

сиона електронска микроскопија (ТЕМ), микроскопија атомских сила (AFM), конфокална и нелинеарна микроскопија (NLM) [29], микротомографија и нанотомографија, дигитална холографија [30, 31] и холографска микроскопија [32].

Дифрактометрија проучава распршивање светлости због дифракције на структурама чије су димензије поредиве са таласном дужином видљиве светлости. Тиме се зрачење расипа у широком просторном углу, а његово мерење омогућава да се стекне увид у природу самих структура. Ако се користе могућности холографије, могуће је добити и слику самих структура (дигитална холографска микроскопија).

Спектрална анализа је једна од важних техника, јер облик спектра одређује обојеност кутикуле [33] и служи као путоказ ка објашњењу оптичких ефеката. Анализа угаоне расподеле расејане светлости једнако је важна, јер суштински зависи од структура на кутикули [34, 35].

Полариметријом се утврђује да ли кутикуларне структуре утичу на поларизацију рефлектоване или пропуштене светлости. Ово има биолошку важност зато што су поједине врсте инсеката способне да виде и стање поларизације те да га користе као сигнал.

Разоткривање доминантних оптичких ефеката се највећим делом своди на симулирање простирања електромагнетног таласа кроз компликоване структуре кутикуле, те поређење са експерименталним мерењима. Примењују се следеће нумеричке технике: метод коначних елемената, метод преносне матрице, ригорозна анализа спрегнутих таласа и др.

Преглед техника за генерисање биомиметских оптичких структура

Анализа фотонских структура указује на доминантне оптичке ефекте, које је потребно имитирати на вештачки начин. С обзиром на микронске и субмикронске структуре и њихову тродимензионалност, оптику инсеката је могуће имитирати неком од мноштва литографских техника: двофотонском стереолитографијом [36], холографском и интерференционом литографијом [37], директним ласерским исписивањем, утискивањем (енгл. *embossing*, *nano-imprint*) [38], директним копирањем (енгл. *templating*, *molding*, *soft-lithography*) [39], јонском литографијом [40] или комбинацијом различитих метода [41]. Немогуће је дати детаљно објашњење поменутих техника у овом релативно кратком тексту па ћемо се концентрисати само на оне методе које су важне за даљи ток излагања.

Двофотонска стереолитографија се заснива на скенирању фотоосетљивог материјала ласерским снопом са ултракратким импулсима дужине трајања од неколико десетина фемтосекунди (један десетомилионити део милионитог дела секунде). У веома малој запремини око фокалне тачке снопа, интензитет светлости је довољно велики да изазове експозицију материјала – испред и иза фокуса материјал је неекспониран. Након

хемијске обраде, појављују се тродимензионалне структуре микронских и субмикронских димензија [42].

Холографска литографија је заснована на контролисаној интерференцији два и више снопова унутар фотоосетљивог материјала [43]. Као што је познато, интерференција формира области повећаног или смањеног интензитета, које различито експонирају материјал. Након хемијске обраде, а у зависности од броја снопова, њихове међусобне оријентације и стања поларизације, могуће је добити велики број правилних кристалних структура [44], сличних онима које се срећу код лептира (нпр. *Callophrys rubi* (Linnaeus, 1758) [45]).

Богатство фотонских морфолошких структура инсеката Србије

Ентомофауна Србије свакако није онако богата као у бразилској прашуми, али и даље пружа изворе инспирације за истраживања на граници биологије, физике, хемије, али и технике и технологије. Са гледишта оптике, визуелни показатељи присуства структура јесу иридесценција, присуство боја из плаво-зеленог дела спектра, као и сребрнкасте или златне боје. Веома често су бела или црна боја (које, стриктно физички говорећи, и нису боје) појачане и потпомогнуте присуством структура.

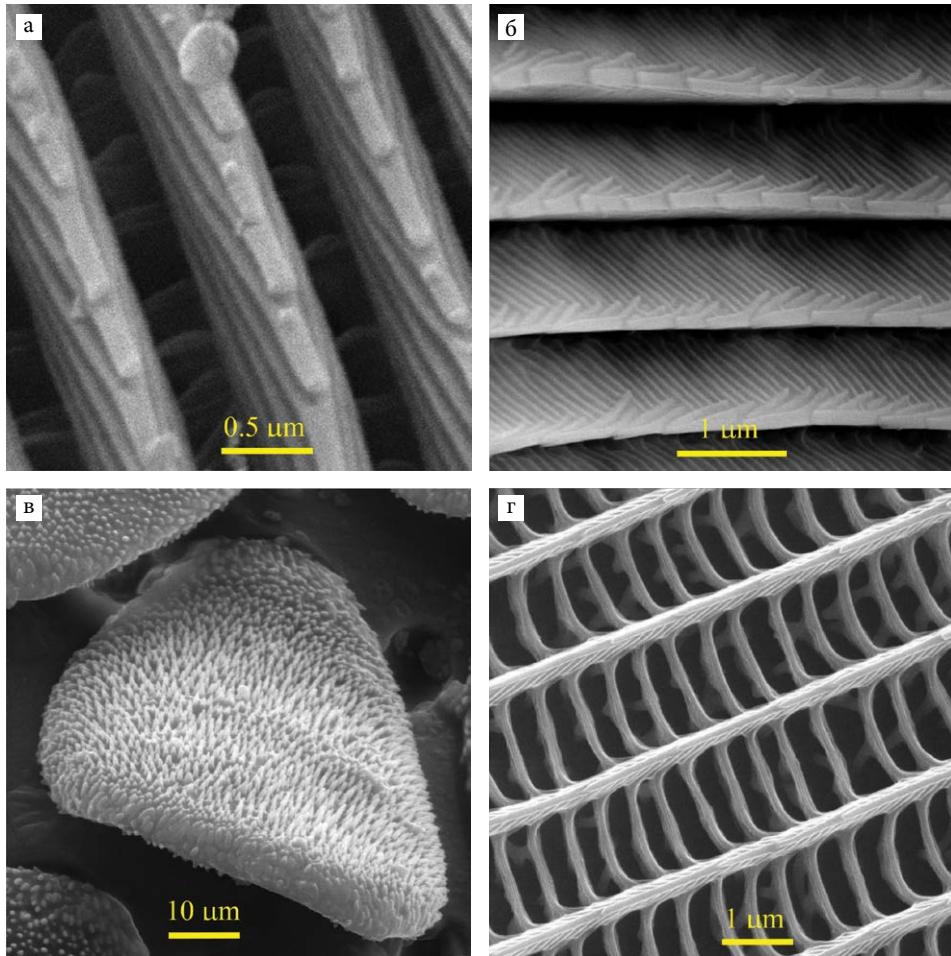
Посебно су интересантни лептири и мољци (Lepidoptera) и неки тврдокрилци (Coleoptera) (фамилије Vuprestidae, Cerambycidae, Rutelidae, Curculionidae и Carabidae), вилини коњици (Odonata), мрежокрилци (Neuroptera) и опнокрилци (Hymenoptera). Крилне љуспице лептира и мољаца могу бити структурно обојене (са типичном структуром као на сл. 4(а) и 4(б)), а код тврдокрилаца и љуспице (сл. 4(в)) и дубински делови кутикуле (сл. 2(б)) учествују у формирању структурних боја. Чак и пигментне љуспице крила лептира имају субмикронску структуру (сл. 4(г)), али се интерференциони ефекти не виде, због тога што је апсорпција светлости доминантна. У табели 1 су приказане неке од биомиметски занимљивих врста инсеката Србије.

У наредна два потпоглавља приказаћемо примере анализе фотонских морфолошких структура инсеката из Србије, њихове миметике и практичне употребе.

Табела 1. Неки од таксона инсеката Србије занимљиви са аспекта биомиметике

Таксон	Ред	Фамилија	Тип структуре
<i>Apatura ilia</i> (Denis & Schiffermüller, 1775)	Lepidoptera	Nymphalidae	Брегова структура љуспица, сл. 4(а)
<i>Apatura iris</i> (Linnaeus, 1758)	Lepidoptera	Nymphalidae	Брегова структура љуспица, сл. 4(а)

Таксон	Ред	Фамилија	Тип структуре
<i>Apatura metis</i> (Freyer, 1829)	Lepidoptera	Nymphalidae	Брегова структура љуспица, сл. 4(а)
<i>Argynnis adippe</i> (Denis & Schiffermüller, 1775)	Lepidoptera	Nymphalidae	Слојевита структура љуспица, сл. 2(а)
<i>Argynnis aglaja</i> (Linnaeus, 1758)	Lepidoptera	Nymphalidae	Слојевита структура љуспица, сл. 2(а)
<i>Argynnis paphia</i> (Linnaeus, 1758)	Lepidoptera	Nymphalidae	Слојевита структура љуспица, сл. 2(а)
<i>Autographa bractea</i> (Denis & Schiffermüller, 1775)	Lepidoptera	Noctuidae	Сложена дифракциона решетка, сл. 4(б)
<i>Autographa gamma</i> (Linnaeus, 1758)	Lepidoptera	Noctuidae	Површинска структура љуспица
<i>Autographa jota</i> (Linnaeus, 1758)	Lepidoptera	Noctuidae	Површинска структура љуспица
<i>Callophrys rubi</i> (Linnaeus, 1758)	Lepidoptera	Lycaenidae	Фотонски кристал
<i>Diachrysia chrysitis</i> (Linnaeus, 1758)	Lepidoptera	Noctuidae	Расејавајући планарни слој, сл. 5(в)
<i>Issoria lathonia</i> (Linnaeus, 1758)	Lepidoptera	Nymphalidae	Површинска структура љуспица, сл. 2(а)
<i>Jordanita globulariae</i> (Hübner, 1793)	Lepidoptera	Zygaenidae	Конкавна запреминска решетка, сл. 2(г)
<i>Pieris brassicae</i> (Linnaeus, 1758)	Lepidoptera	Pieridae	Флуоресцентне наночестице
<i>Pieris rapae</i> (Linnaeus, 1758)	Lepidoptera	Pieridae	Флуоресцентне наночестице
<i>Polyommatus bellargus</i> (Rottemburg, 1775)	Lepidoptera	Lycaenidae	Расејавајућа запреминска решетка
<i>Calosoma sycophanta</i> (Linnaeus, 1758)	Coleoptera	Carabidae	Кутикуларна запреминска структура, сл. 2(б)
<i>Hoplia argentea</i> (Poda, 1761)	Coleoptera	Rutelidae	Рандомизована површинска решетка, сл. 4(в)
<i>Laemostenus punctatus</i> (Dejean, 1828)	Coleoptera	Carabidae	Кутикуларна запреминска структура
<i>Morimus asper funereus</i> Mulsant, 1862	Coleoptera	Cerambycidae	Апсорпционе длачице
<i>Rosalia alpina</i> (Linnaeus, 1758)	Coleoptera	Cerambycidae	Апсорпционе длачице



Слика 4. Изглед (а) структурно обојених љуспица лептира *Apatura iris* (Linnaeus, 1758), (б) мољца *Autographa bractea* (Denis & Schiffermüller, 1775) и (в) тврдокрилца *Hoplia argentea* (Poda, 1761) и (г) пигментне љуспице лептира *A. adippe* (Denis & Schiffermüller, 1775)

Холографска биомиметика Diachrysia chrysitis (Linnaeus, 1758)

Совица *D. chrysitis* (сл. 5(а)) поседује изражену структурну обојеност на широким зонама дорзалне стране предњих крила. Златна обојеност ових области највероватније има дисруптивну функцију, која обезбеђује разбијање контуре тела и теже препознавање од стране предатора. Занимљиво је да посматрање под оптичким трансмисионим микроскопом показује да су појединачне љуспице веома провидне (сл. 5(б)), али њихов просторни распоред у виду двоструког слоја (који чине покровне и базне љуспице) даје интензивну златну рефлексију. Скенирајућа електронска

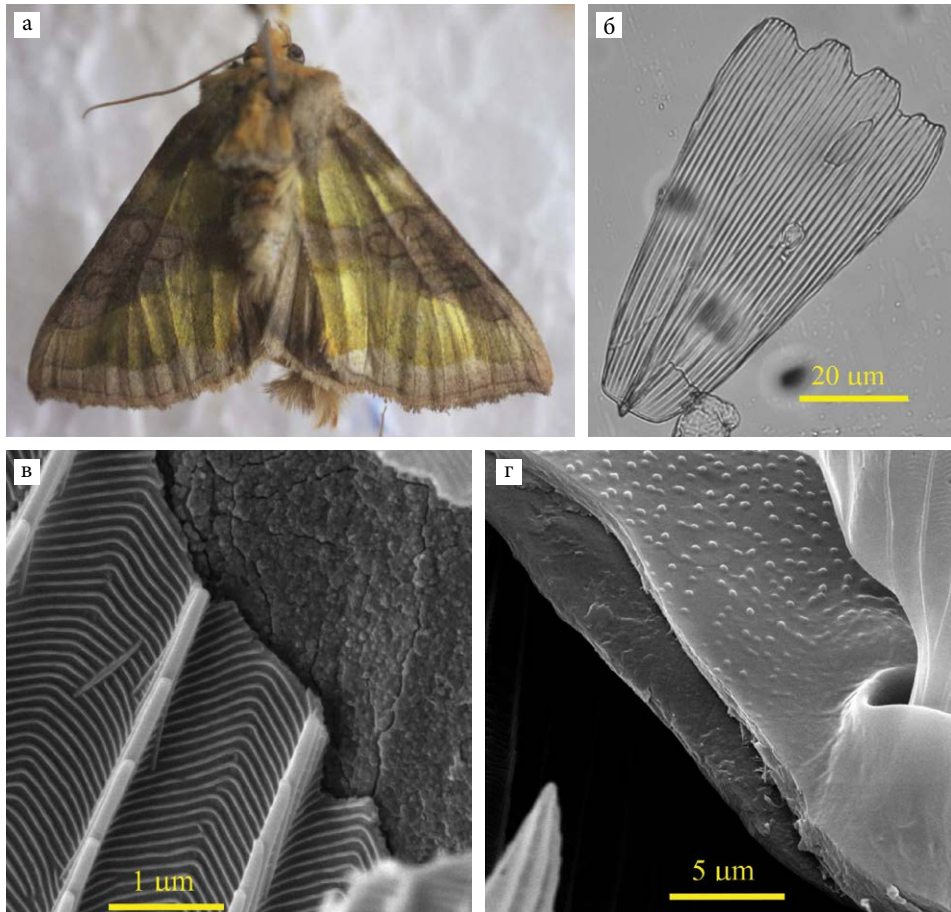
микроскопија (сл. 5(в)) показује једноставну површинску структуру, која се састоји од широко размакнутих гребена (на међусобном растојању од око 2 μm), који су повезани густо распоређеним попречним ребрима (на растојању од око 0.15 μm), облика рибље кости. Прорачун показује да је за златну боју одговорна неравна површина унутрашњости љуспице (сл. 5(в)). Расејање на овој површини уклања плави део спектра из светлости, док веће таласне дужине рефлектује, што одговара златној боји (сл. 5(г)).

Оптичке структуре овог мољца могуће је имитирати холографски. Ми смо користили интерференцију два контра-пропагирајућа ласерска снопа (таласне дужине 532 nm). Као фотоосетљиви материјал, коришћен је танак слој пулулана (природни полисахарид), са додатком јона хрома (дихромирани пулулан). Након хемијске обраде, формиран је низ слојева између којих се налази велики број наночестица (сл. 6(а)). У рефлексији овако добијен слој има златни одсејак попут оног код *D. chrysitis* (сл. 6(а) и 6(б)).

*Варијабилност, јединственост и функционализација љуспица крила
лептира *Issoria lathonia* (Linnaeus, 1758),
Argynnis aglaja (Linnaeus, 1758) и *A. adippe**

Посматрање љуспица крила лептира под оптичким микроскопом открива велику разноврсност њихових облика и боја (сл. 7(а)). На већим увеличањима, посматрајући скенирајућим електронским микроскопом, видимо да постоји одговарајућа варијабилност микронских и субмикронских морфолошких структура (сл. 7(б) и 7(в)). Математичка анализа распореда боја на слици снимљеној под оптичким трансмисионим микроскопом (сл. 7(а)) или међусобног положаја попречних ребара на слици добијеној помоћу скенирајућег електронског микроскопа (сл. 7(в)), показује да је вероватноћа проналажења две идентичне љуспице екстремно мала – чак 10^{-92} . У практичном смислу, можемо да тврдимо да је немогуће наћи две идентичне љуспице, тј. да је свака потпуно јединствена – онако како су јединствени отисци прста, боје дужице ока или распоред крвних судова очног дна код човека.

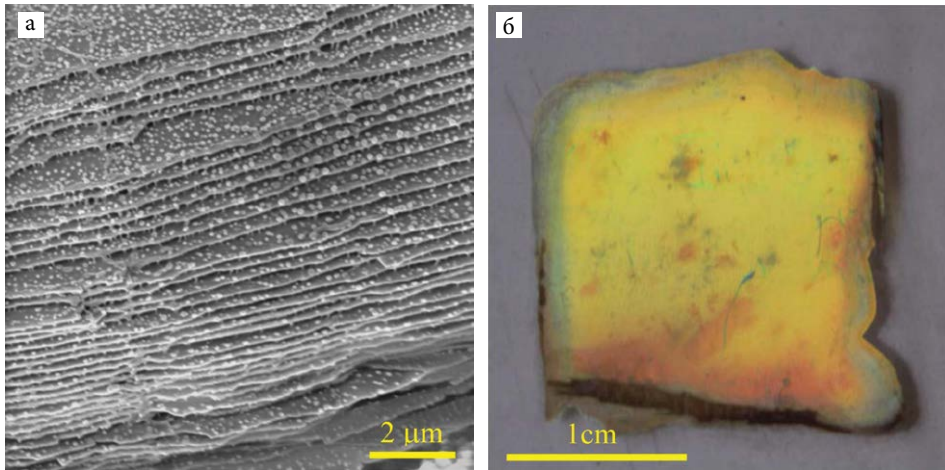
Јединственост указује на висок потенцијал коришћења љуспица крила *Lepidoptera* као елемената за заштиту докумената [46, 47]. Ако се љуспица перманентно интегрише у документ (новчаницу, личну карту, пасош), он постаје непоновљив и веома компликован за фалсификовање због тродимензионалне, субмикронске структуре љуспица. Ово је значајан напредак у односу на тренутно коришћене технике заштите [48], које се заснивају на сложености заштитних елемената (нпр. холограм), али без јединствености (сви холограми на новчаницама од 1000 динара су потпуно идентични). Тиме се приближавамо савременим настојањима да се документи персонализују [49]. Још једна од предности овог вида



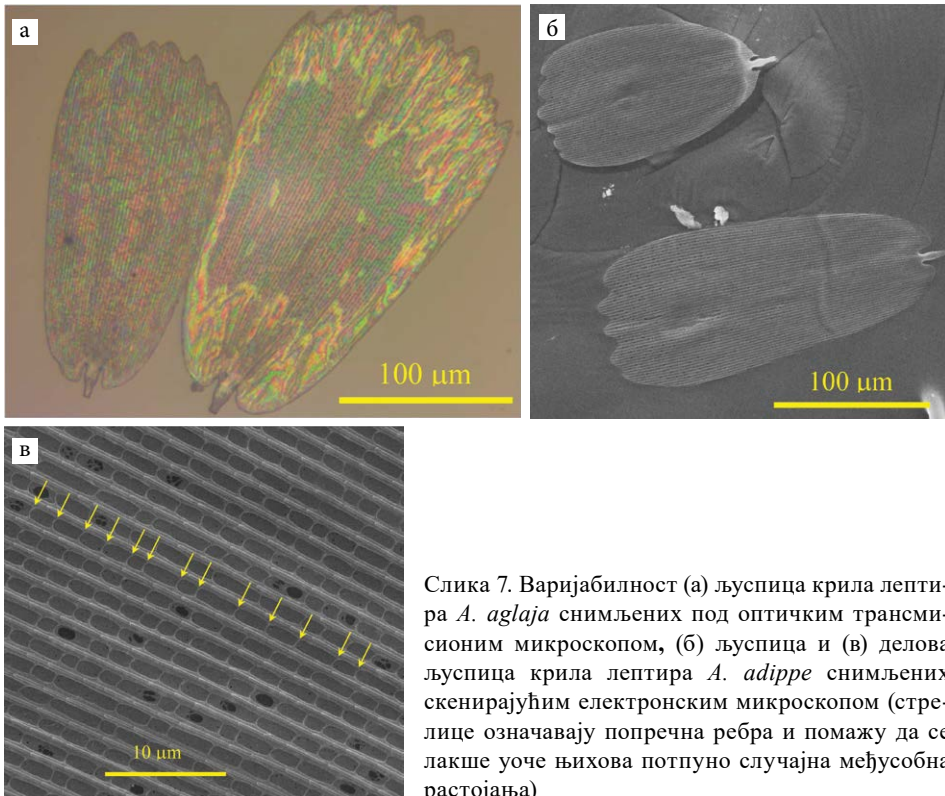
Слика 5. (а) Структурна обојеност предњих крила, (б) појединачна крилна љуспица снимљена под оптичким трансмисионим микроскопом, (в) неравна површина унутрашњости љуспице и (г) расејавајућа површина крилне мембране мољца *D. chrysitis*

заштите је и велика трајност хитинских структура, које у ентомолошким збиркама преживљавају десетине, па и стотине година без икакве промене оптичких својстава. Штавише, пронађени су фосилизовани остаци мољца старог 47 милиона година [50], чија је структурна обојеност била очувана!

Код свих елемената за оптичку заштиту важна је и могућност уписа додатних информација (попут личних података, слика или биометријских карактеристика). Показали смо да је применом ултракратких ласерских импулса могуће на контролисан начин уписивати податке на појединачне љуспице крила *Lepidoptera*. Модификован је раније развијен систем за ласерску микроскопију [29], тако да ласерски снап може да исписује про-

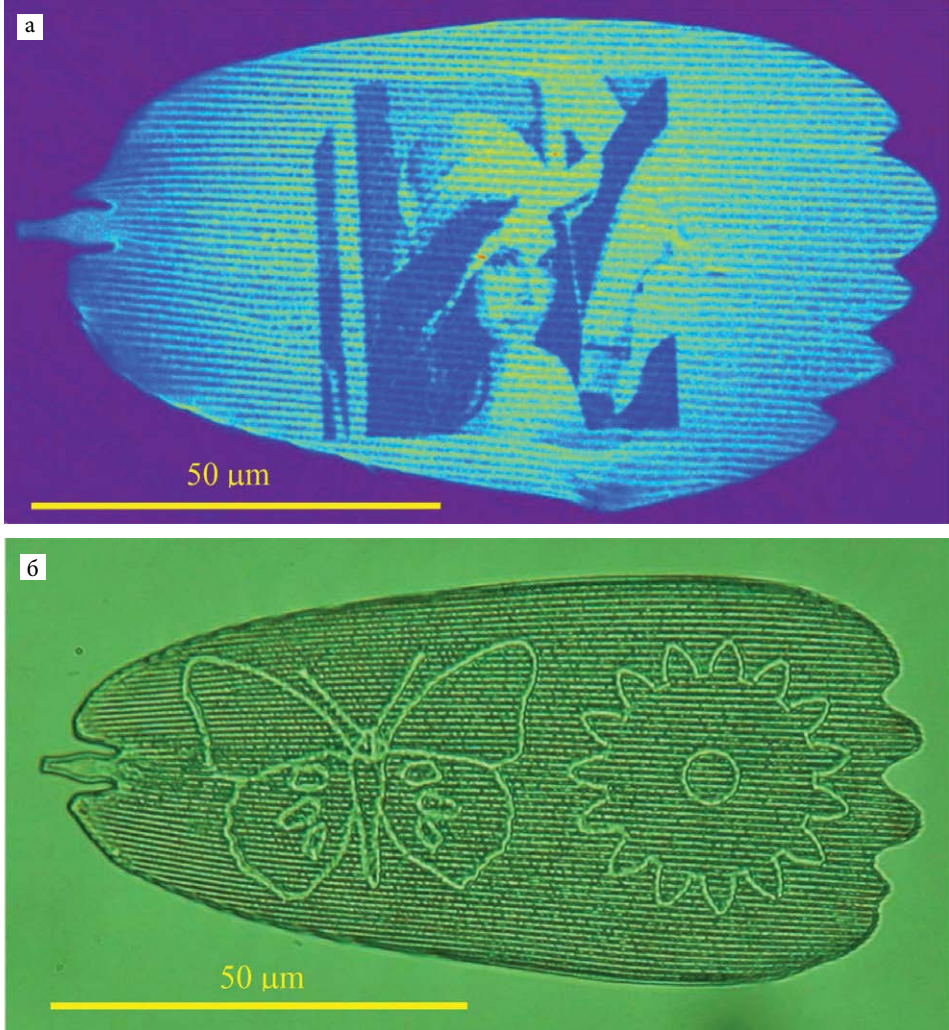


Слика 6. (а) Холографски добијени слојеви на дихромираном пулулану, као имитација унутрашње структуре љуспице *D. chrysis*. Снимак је добијен скенирајућим електронским микроскопом. (б) Фотографија рефлексије са холографски модификованог слоја дихромираног пулулана



Слика 7. Варијабилност (а) љуспица крила лептира *A. aglaja* снимљених под оптичким трансмисионим микроскопом, (б) љуспица и (в) делова љуспица крила лептира *A. adippe* снимљених скенирајућим електронским микроскопом (стрелице означавају попречна ребра и помажу да се лакше уоче њихова потпуно случајна међусобна растојања)

извољно задату слику [51]. У зависности од интензитета ласерског снопа, исписивање је могуће реализовати променом флуоресцентних особина хитина, избелјивањем (сл. 8(а)) или сечењем (сл. 8(б)).



Слика 8. Слике добијене (а) ласерским избелјивањем и (б) ласерским сечењем луспице крила лептира *I. lathonia*

ЗАКЉУЧНА РАЗМАТРАЊА

Биомиметика, биоинспирација и функционализација биолошких структура су области које се веома интензивно развијају [52]. Широко су конципиране и тешко их је јасно дефинисати – можда је најисправније рећи да се више ради о погледу на свет него о јасно дефинисаном правцу истраживања [53]. Ипак, истраживања из ових области су обимна по броју објављених радова и веома значајна (мерено бројем цитата). Стога су се појавили и специјализовани часописи, попут “Bioinspiration and Biomimetics” или “Robotics and Biomimetics”, а у реномираним научним часописима, као што су “Nature” и “Science”, чести су радови из ових области. Сем тога, резултати су већ нашли и практичне, индустријске примене у области адхезива, дисплеја, козметике и др.

Свака техничка област истраживања лако може наћи свој пандан у живом свету: машинство – у необичној структури биолошких композита или механици покрета животиња, рачунарство – у комплексним неуронским мрежама животиња и еволуционим принципима, оптика – у интегументу или сложеним очима инсеката, хемија – у богатству биолошких супстанци, аеронаутика – у птицама и летећим инсектима а, нажалост, и војна наука има изванредног учитеља у живом свету, угледајући се на вечиту борбу за опстанак. Овом списку заиста нема краја и у томе је и велика привлачност биомиметике. У овој области, биолози и стручњаци из других области се налазе на заједничком задатку уочавања занимљивих особина живих организама и проналажењу начина да се ове особине искористе.

Инсекти су најбогатији извор инспирације због чињенице да је еволутивним развојем настало више милиона врста, а присутна је и велика разноврсност форми. И у Србији постоји велики број врста инсеката, али мало је доступних података о њиховим кутикуларним структурама од потенцијалног интереса за биомиметику. Мислимо да би било од великог практичног значаја да се направи нека врста илустрованог каталога микроструктура и нано-структура инсеката Србије, посебно за редове *Lepidoptera* и *Coleoptera*. Каталог би укључивао морфолошке карактеристике микроструктура и наноструктура кутикуле (очију, крила, антена, ногу и др.), али и њихове оптичке и механичке карактеристике. Тиме би се значајно олакшао посао будућим истраживачима у области биомиметике.

РЕФЕРЕНЦЕ

- [1] Wood, R., Nagpal, R., Wei, G.-Y. (2013): Flight of the robobees. *Sci. Am.*, 308: 60–65.
- [2] Lilienthal (1889): *Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst. Ein Beitrag zur Systematik der Flugtechnik*, Berlin, R. Gaertners Verlagsbuchhandlung, p. 187.
- [3] Gardner, M. (1970): Mathematical games: the fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life". *Sci. Am.*, 223: 120–123.
- [4] Bonebeau, E., Dorigo, M., Theraulaz, G. (2000): Inspiration for optimization from social insect behaviour. *Nature*, 406: 39–42.
- [5] Song, Y.M., Xie, Y., Malyarchuk, V., Xiao, Y., Jung, I., Choi, K.-J., Liu, Z., Park, H., Lu, C., Kim, R.-H., Li, R., Crozier, K.B., Huang, Y., Rogers, J.A. (2013): Digital cameras with designs inspired by the arthropod eye. *Nature*, 497: 95–99.
- [6] Feng, L., Li, S., Li, Y., Li, H., Zhang, L., Zhai, J., Song, Y., Liu, B., Jiang, L., Zhu, D. (2002): Super-hydrophobic surfaces: from natural to artificial. *Adv. Mater.*, 14: 1857–1860.
- [7] Dean, B., Bhushan, B. (2010): Shark-skin surfaces for fluid-drag reduction in turbulent flow: a review. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 368: 4755–4806.
- [8] Park, S.-H., Lee, S., Moreira, D., Bandaru, P.R., Han, I., Yun, D.-J. (2015): Bioinspired superhydrophobic surfaces, fabricated through simple and scalable roll-to-roll processing. *Sci. Rep.*, 5: 15430.
- [9] Hamm, C.E., Merkel, R., Springer, O., Jurkojc, P., Maier, C., Prechtel, K., Smetacek, V. (2003): Architecture and material properties of diatom shells provide effective mechanical protection. *Nature*, 421: 841–843.
- [10] Wegst, U.G.K., Bai, H., Saiz, E., Tomsia, A.P., Ritchie, R.O. (2015): Bio-inspired structural materials. *Nat. Mater.*, 14: 23–36.
- [11] Whitesides, G.M. (2015): Bioinspiration: something for everyone. *Interface Focus* 5: 20150031.
- [12] Roberts, N.W., Chiou, T.-H., Marshall, N.J., Cronin, T.W. (2009): A biological quarter-wave retarder with excellent achromaticity in the visible wavelength region. *Nat. Photonics*, 3: 641–644.
- [13] Darius, J., Thomas, P.K. (1981): Crosswires in a guiding eyepieces. *J. Phys. E: Sci. Instrum.*, 14: 761–765.
- [14] Parker, A.R., Townley, H.E. (2007): Biomimetics of photonic nanostructures. *Nat. Nanotechnol.* 2: 347–353.
- [15] Burrows, M., Sutton, G. (2013): Interacting gears synchronize propulsive movements in a jumping insect. *Science*, 341: 1254–1256.
- [16] Zheng, Y., Gao, X., Jiang, L. (2007): Directional adhesion of superhydrophobic butterfly wings. *Soft Matter*, 3: 178–182.
- [17] Dirks, J.-H. (2016): Adhesion in insects. In: Bhushan, B. ed. *Encyclopedia of Nanotechnology*, 2nd ed., Dordrecht, Springer, pp. 1–10.

- [18] Stavenga, D.G., Foletti, S., Palasantzas, G., Arikawa, K. (2006): Light on the moth-eye corneal nipple array of butterflies. *Proc. Roy. Soc. B*, 273: 661–667.
- [19] Jeong, K.-H., Kim, J., Lee, L.P. (2006): Biologically inspired artificial compound eyes. *Science*, 312: 557–561.
- [20] Garrett, N.L., Sekine, R., Dixon, M.W.A., Tilley, L., Bambery, K.R., Wood, B.R. (2015): Bio-sensing with butterfly wings: naturally occurring nano-structures for SERS-based malaria parasite detection. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 17: 21164–21168.
- [21] Tan, Y., Gu, J., Xu, W., Chen, Z., Liu, D., Liu, Q., Zhang, D. (2013): Reduction of CuO butterfly wing scales generates Cu SERS substrates for DNA base detection. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 5: 9878–9882.
- [22] Potyrailo, R.A., Ghiradella, H., Vertiatchikh, A., Dovidenko, K., Cournoyer, J.R., Olson, E. (2007): *Morpho* butterfly wing scales demonstrate highly selective vapour response. *Nat. Photonics*, 1: 123–128.
- [23] England, G., Kolle, M., Kim, P., Khan, M., Muñoz, P., Mazur, E., Aizenberg, J. (2014): Bioinspired micrograting arrays mimicking the reverse color diffraction elements evolved by the butterfly *Pierella luna*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 111: 15630–15634.
- [24] Shi, N.N., Tsai, C.-C., Camino, F., Bernard, G.D., Yu, N., Wehner, R. (2015): Keeping cool: enhanced optical reflection and heat dissipation in silver ants. *Science*, 349: 298–301.
- [25] Kahl, T., Bousack, H., Schneider, E.S., Schmitz, H. (2014): Infrared receptors of pyrophilous jewel beetles as model for new infrared sensors. *Sensor Rev.*, 34: 123–134.
- [26] Pris, A.D., Utturkar, Y., Surman, C., Morris, W.G., Vert, A., Zalyubovskiy, S., Deng, T., Ghiradella, H.T., Potyrailo, R.A. (2012): Towards high-speed imaging of infrared photons with bio-inspired nanoarchitectures. *Nat. Photonics*, 6: 195–200.
- [27] Fox, D.L. (1976): *Animal Biochromes and Structural Colours: Physical, Chemical, Distributional & Physiological Features of Colored Bodies in the Animal World*, 2nd ed., Berkeley, University of California Press, p. 433.
- [28] Huang, J., Wang, X., Wang, L.W. (2008): Bio-inspired fabrication of antireflection nanostructures by replicating fly eyes. *Nanotechnology*, 19: 025602.
- [29] Rabasović, D.M., Pantelić, D.V., Jelenković, B.M., Ćurčić, S.B., Rabasović, M.S., Vrbica, M.D., Lazović, V.M., Ćurčić, B.P.M., Krmpot, A.J. (2015): Nonlinear microscopy of chitin and chitinous structures: a case study of two cave-dwelling insects. *J. Biomed. Opt.*, 20: 016010.
- [30] Aguayo, D.D., Mendoza Santoyo, F., De la Torre-I, M.H., Salas-Araiza, M.D., Caloca-Mendez, C., Gutierrez Hernandez, D. A. (2010): Insect wing deformation measurements using high speed digital holographic interferometry. *Opt. Express*, 18: 5661–5667.

- [31] Pantelić, D.V., Grujić, D.Ž., Vasiljević, D.M. (2014): Single-beam, dual-view digital holographic interferometry for biomechanical strain measurements of biological objects. *J. Biomed. Opt.*, 19: 127005.
- [32] Martinez-Leon, L., Pedrini, G., Osten, W. (2005): Applications of short-coherence digital holography in microscopy. *Appl. Opt.*, 19: 3977–3984.
- [33] Pantelić, D., Ćurčić, S., Savić-Šević, S., Korać, A., Kovačević, A., Ćurčić, B., Bokić, B. (2011): High angular and spectral selectivity of purple emperor (*Lepidoptera: Apatura iris* and *A. ilia*) butterfly wings. *Opt. Express*, 19: 5817–5826.
- [34] Savić-Šević, S., Pantelić, D., Grujić, D., Jelenković, B., Ćurčić, S., Ćurčić, B., Stojanović, D. (2012): *Localization of light in photonic crystals of biological origin*, Conference Proceedings, 14th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), Coventry, 02–05 July 2012. pp. 1–3.
- [35] Pantelić, D., Savić-Šević, S., Grujić, D. (2013). Zoom system for measurement of coherent backscattering of light in micro- and nanomaterials. *Phys. Scr.*, T157: 014020.
- [36] Liu, Y., Nolte, D., Pyrak-Nolte, L.J. (2010): Large-format fabrication by two-photon polymerization in SU-8. *Appl. Phys. A*, 100: 181–191.
- [37] Siddique, R.H., Hünig, R., Faisal, A., Lemmer, U., Hölscher, H. (2015): Fabrication of hierarchical photonic nanostructures inspired by *Morpho* butterflies utilizing laser interference lithography. *Opt. Mater. Express*, 5: 996–1005.
- [38] Savić-Šević, S., Pantelić, D. (2005): Relief hologram replication using a dental composite as an embossing tool. *Opt. Express*, 13: 2747–2754.
- [39] Kang, S.-H., Tai, T.-Y., Fang, T.-H. (2010): Replication of butterfly wing microstructures using molding lithography. *Curr. Appl. Phys.*, 10: 625–630.
- [40] Juodkazis, S., Rosa, L., Bauerdick, S., Peto, L., El-Ganainy, R., John, S. (2011): Sculpturing of photonic crystals by ion beam lithography: towards complete photonic bandgap at visible wavelengths. *Opt. Express*, 19: 5802–5810.
- [41] Burgess, I.B., Aizenberg, J., Loncar, M. (2013): Creating bio-inspired hierarchical 3D-2D photonic stacks via planar lithography on self-assembled inverse opals. *Bioinspir. Biomim.*, 8: 045004.
- [42] Gan, Z., Turner, M.D., Gu, M. (2016): Biomimetic gyroid nanostructures exceeding their natural origins. *Sci. Adv.*, 2: e1600084.
- [43] Campbell, M., Sharp, D.N., Harrison, M.T., Denning, R.G., Turberfield, A.J. (2000): Fabrication of photonic crystals for the visible spectrum by holographic lithography. *Nature*, 404: 53–56.
- [44] Wang, X., Gao, W., Hung, J., Tam, W.Y. (2014): Optical activities of large-area SU8 microspirals fabricated by multibeam holographic lithography. *Appl. Opt.*, 53: 2425–2430.

- [45] Saranathan, V., Osuji, C.O., Mochrie, S.G., Noh, H., Narayanan, S., Sandy, A., Dufresne, E.R., Prum, R.O. (2010): Structure, function, and self-assembly of single network gyroid (I4132) photonic crystals in butterfly wing scales. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 107: 11676–11681.
- [46] Pantelic, D., Rabasovic, M., Krmpot, A., Lazovic, V., Pavlovic, D. (2015): Security device individualized with biological particles. *PCT/EP2015/081398*.
- [47] Pantelic, D., Rabasovic, M., Krmpot, A., Lazovic, V., Pavlovic, D. (2015): Security tag containing a pattern of biological particles. *PCT/EP2015/081400*.
- [48] Van Renesse, R.L. (2005): *Optical Document Security*, 3rd ed., Boston-London, Artech House, p. 386.
- [49] Nam, H., Song, K., Ha, D., Kim, T. (2016): Inkjet printing based mono-layered photonic crystal patterning for anti-counterfeiting structural colors. *Sci. Rep.*, 6: 30885.
- [50] McNamara, M.E., Briggs, D.E.G., Orr, P.J., Wedmann, S., Noh, H., Cao, H. (2011): Fossilized biophotonic nanostructures reveal the original colors of 47-million-years-old moths. *PLoS Biol.*, 9: e1001200.
- [51] Pantelic, D., Rabasovic, M., Krmpot, A., Lazovic, V., Pavlovic, D. (2015): Security tag with laser-cut particles of biological origin. *PCT/EP2015/081407*.
- [52] Lepora, N.F., Verschure, P., Prescott, T.J. (2013): The state of the art in biomimetics. *Bioinspir. Biomim.*, 8: 013001.
- [53] Vincent, J.F.V., Bogatyreva, O.A., Bogatyrev, N.R., Bowyer, A., Pahl, A.-K. (2006): Biomimetics: its practice and theory. *J. R. Soc. Interface*, 3: 471–482.

ЗАХВАЛНИЦА

Захваљујемо се Министарству просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије за подршку кроз следеће пројекте: ОН171038, ОН173038, ИИИ45016 и ИИИ43002.

THE MORPHOLOGICAL STRUCTURES OF SOME REPRESENTATIVES OF THE ENTOMOFAUNA OF SERBIA AS MODELS IN BIOMIMETICS

Dejan PANTELIĆ, Srećko ĆURČIĆ, Aleksandar KRMPOT,
Dejan V. STOJANOVIĆ, Mihailo RABASOVIĆ, Svetlana SAVIĆ-ŠEVIĆ

S u m m a r y

Biomimetics, bioinspiration and functionalization of biological structures are disciplines of intense research. They are wide in scope but not easy to define – this is more a worldview, rather than a well defined research direction. Anyway, the research is voluminous measured by the number of scientific papers and very important by numerous citations. This is why specialized journals have appeared such as “Bioinspiration and Biomimetics” and “Robotics and Biomimetics”, while renowned journals “Nature” and “Science” frequently publish papers in this area. Apart from this, the practical results have found the application in adhesives, displays, cosmetics, etc.

Each and every technical research area can find its counterpart in the living world: machine engineering in the unusual properties of biological composites or mechanics of animals, computing in the complex neural networks or evolutionary principles, optics in the integument and compound eyes of insects, chemistry in the richness of biological substances, aeronautics in birds and flying insects, and, regrettably, military science has an excellent teacher in the living world too, inspired by the eternal battlefield of survival. There is no end of this list, which is one of the main appeals of biomimetics. In this area, biologists and specialists in other disciplines have a common task of finding interesting properties of living organisms and discovering ways to use their properties.

Insects are the richest source of inspiration due to the number of several million species created during the evolutionary history, with the enormous diversity in both form and function. There is a great diversity of insect species in Serbia as well, but with a small amount of available information on the cuticular structures of interest for biomimetics. We think that it would be of practical interest to make an illustrated catalogue of the micro- and nano-structures of insects of Serbia, in particular for the orders of Lepidoptera and Coleoptera. Catalogue would include morphological characteristic of the micro- and nano-structures of (cuticle, eyes, wings, antennas, legs, etc.), but also their optical and mechanical properties. This will significantly facilitate the future research in biomimetics.