

Kako poslušamo čmrlje?

dr. Anton Gradišek

Institut Jožef Stefan, Ljubljana

Izvleček

Bioakustika je veda, ki preučuje zvoke, ki jih proizvajajo živa bitja. V zadnjem času nam pri tem vedno bolj lahko pomagajo računalniški algoritmi. V prispevku predstavimo nekaj akustičnih študij čmrljev. Ti pomembni oprasovalci, s katerimi smo se gotovo že srečali na cvetočem travniku, lahko proizvajajo različne tipe zvokov, najbolj znano je seveda brenčanje med letom. Preučevali smo frekvenčno strukturo zvokov, z metodami strojnega učenja smo razvili klasifikacijski algoritem, ki prepozna, za katero vrsto in tip čmrlja gre, ter razvili enostaven algoritem za štetje prihodov in odhodov čmrljev iz panja.

Ključne besede: bioakustika, zvok, čmrlji, frekvenca zvoka.

How to Listen to Bumblebees?

Abstract

Bioacoustics is the science concerned with the production of sound by living organisms. Computer algorithms have become a crucial element in the analysis. This paper presents several recent acoustic studies of bumblebees. These essential pollinators, whom everyone must have already encountered in a flowering meadow, produce different sounds, of which the flight buzzing sound is the most immediately recognisable. We studied the frequency structure of diverse types of sounds, developed a machine-learning classification algorithm to predict bumblebee species and types, and developed a simple algorithm to track bumblebee arrivals and departures from the hive.

Keywords: bioacoustics, sound, bumblebees, sound frequency.

Nekaj utrinkov iz bioakustike

Bioakustika je interdisciplinarna veda, ki združuje akustiko in biologijo, v zadnjem času pa vedno bolj tudi znanja s področja računalništva in umetne inteligence. Preučuje zvoke, ki jih proizvajajo živa bitja, to pa vključuje načine, kako se zvoki proizvajajo, zaznavajo in prenašajo po mediju, predvsem po zraku in po vodi. Začetnik sodobne bioakustike je bil slovenski zoolog Ivan Regen (1868–1947), ki je konec 19. in v prvi polovici 20. stoletja preučeval oglašanje žuželk, predvsem kobilic in murnov. Zanimalo ga je, kako žuželke med seboj komunicirajo, natančneje, kako lahko samica v visoki travi poišče samca, ki se oglašja. Samci proizvajajo zvok s stridulacijo, to je proces, pri katerem žuželka med seboj drgne dva trdna, a prožna dela telesa in s tem ustvarja vibracije. Pri murnih gre za drgnjenje kril, pri kobilicah kratkotipalčnicah pa denimo za drgnjenje krila ob posebno strukturo na zadnjih nogah. Mehanizmi poslušanja takrat še niso bili dobro pojasnjeni, znanstveniki si namreč niso bili enotni, ali žuželke poslušajo s pomočjo tipalnic ali pa morda zaznavajo tresljaje, ki se prenašajo po podlagi. Regen je z vrsto poskusov pokazal, da samice poslušajo samce s pomočjo timpanalnega organa, ki se nahaja

na golencih sprednjih nog [1]. To je kožnata membrana, ki zaniha ob stiku z zvočnim valovanjem, žuželka pa to zazna s posebnimi receptorji. Nekateri poskusi so bili še posebej zanimivi. Možnost, da samice zaznavajo tresljaje, ki se prenašajo po podlagi, je izključil tako, da je samca s pomočjo balona dvignil v zrak. Scenarij, po katerem bi samice samca poiskale s pomočjo vida ali vonja, je izključil tako, da je samici predstavil dva samca – eden je bil nem in viden, drugi pa je prepeval, a je bil skrit za zaslonom. Samica se je vedno usmerila k pojočemu samcu. Ta poskus je deloval celo, če je Regen samo predvajal posnetek petja. Statistično je Regen funkcijo timpanalnega organa demonstriral v terenskem poskusu s 1600 murnovimi samicami, kjer je polovici samic že v fazi ličinke poškodoval timpanalni organ, nekaterim pa je odstranil tudi tipalnice. K pojočemu samcu na travniku so vedno prišle le samice z nepoškodovanimi slušnimi organi, s tipalnicami ali brez.

Danes je bioakustika pomembna tudi na področju spremljanja biodiverzitete. Ste kdaj v gozdu zaprli oči in se osredotočili samo na poslušanje? Kar slišimo, lahko poimenujemo zvočna pokrajina. Sestavljena je iz antropogenih zvokov (npr. zvok prometa), zvokov iz narave, kot

so zvoki vetra ali dežja, in zvokov, ki jih proizvajajo živali. Odvisno od lokacije in dela dneva lahko slišimo ptiče, sesalce, žuželke, žabe ... Živali se oglašajo iz različnih vzgibov. Nekatere z oglašanjem označujejo teritorij, pri drugih gre za paritvene klice, lahko gre tudi za opozarjanje na nevarnost, ko ena od živali v tropu zagleda plenilca. Zvočna pokrajina nam daje dober vpogled v biotsko raznovrstnost na določenem območju. V kakofoniji zvokov se vsaka živalska vrsta oglašuje drugače – v svojem frekvenčnem območju ali s svojo pesmijo, s posebnim akustičnim vzorcem. Seveda, živali se prilagodijo, tako da si najdejo svojo akustično nišo, kjer se njihov klic ne izgubi v množici ostalih. Če poenostavimo, kompleksnejša ko je torej zvočna pokrajina, večja je biodiverziteteta in bolj zdrav je ekosistem [2]. To velja tako za tropski deževni gozd, za afriško savano kot tudi za sosednjo mlako.

Antropogeni hrup na živali običajno vpliva negativno. Če se frekvenčno območje hrupa prekriva z območjem, v katerem se živali oglašajo, lahko to pripelje do motenj v komunikaciji. Primerjave med ptiči iste vrste, ki živijo v mestu ali na podeželju, so pokazale, da osebkovi v mestu spremenijo obnašanje. Raziskave so pokazale, da se taščice v mestih raje oglašajo bolj proti večeru, ko je hrupa manj, kosi (in še nekaj drugih vrst) pa v mestu pojejo pri višjih frekvencah. Mogoča razloga sta dva, po eni strani se tako izogibajo nizkofrekvenčnemu hrupu, po drugi strani pa pri višji frekvenci lahko ustvarjajo močnejši zvok, ki se zato širi dlje [3]. Že dolgo je znano tudi, da zvok, ki ga v morju ustvarjajo plovila, slabo vpliva na kite. Gre za nizkofrekvenčne zvoke, ki se prekrivajo z območji, v katerih kiti komunicirajo. Posledice pri kitih so lahko poškodbe sluha, stres, spremembe obnašanja in tudi nepričakovana nasedanja. Negativne učinke so opazili tudi pri tjušnjih [4].

Živalske zvoke spremljamo z mikrofoni. Posnetke lahko nato analiziramo, pri tem pa nam pomagajo računalniške metode. V nadaljevanju si bomo ogledali nekaj primerov, kako lahko s pomočjo analize zvoka spremljamo čmrlje.

Kakšne zvoke proizvajajo čmrlji?

Čmrlji (*Bombus spp.*) spadajo v družino čebel (Apidae), vendar se od dobro znane medonosne čebele razlikujejo v več pogledih. So socialne žuželke, družino z matico in delavkami lahko sestavlja od nekaj deset do nekaj sto osebkov (za primerjavo: pri medonosni čebeli je v panju več deset tisoč delavk). Čebelja družina v panju prezimi, pri čmrljih pa zimo preživijo le mlade matice, ki se spomladi prebudijo iz hibernacije, poiščejo primerno mesto za gnezdo in začnejo ustvarjati družino. Ob koncu sezone se izležejo mlade matice in samčki, ki zapustijo gnezdo, se pariyo, matice nato poiščejo ustrezno prezimovališče, gnezdo pa počasi propade [5]. V Sloveniji poznamo 35 vrst čmrljev, na svetu pa jih je okrog 250. So pomembni opraševalci. Za razliko od medonosne čebele

letajo tudi ob nizkih temperaturah in v slabem vremenu, poleg tega pa so večji in bolj kosmati. Zato so izredno učinkoviti pri opraševanju rastlin, nanje se prime več cvetnega prahu. Oprahujejo nekatere rastlinske vrste, ki jih čebele ne. Tak primer je paradižnik (kot zanimivost, čmrlji oprahujejo paradižnike v rastlinjaki, trgovanje z družinami čmrljev pa je donosen posel za nekaj podjetij, ki se s tem ukvarjajo). V divjini čmrlji gnezdiyo v opuščeni gnezdihi glodavcev, v duplinah, v šopih trave, v grmovju, zadnje čase pa tudi v objektih človeške izdelave.

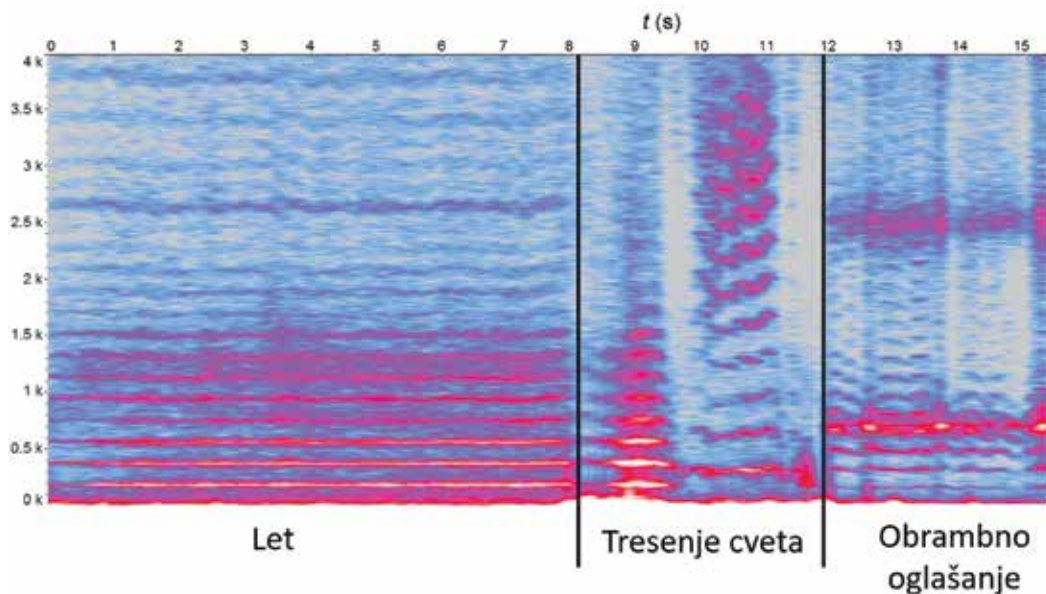
Kakšne zvoke pa proizvajajo čmrlji? Najbolj tipičen zvok je seveda zvok brenčanja med letom. Ta zvok nastane kot posledica mahanja s krili. Osnovna frekvenca je odvisna od vrste in tipa čmrlja (matice so večje, delavke manjše), nekje med 130 in 250 Hz. Nekatere rastline imajo cvetove, kjer se pelod močno drži prašnikov in potrebuje stresanje, da se sprost. Čmrlji so ena od vrst, ki je tega sposobna – čmrlj ustvarja tresenje tako, da trese letalne mišice, ne pa tudi kril. Zaradi manjšega vztrajnostnega momenta ti tresljaji potekajo pri višji frekvenci kot pri letenju.

Izpostavimo še dva tipa zvokov v gnezdu. Prvi je povezan s termoregulacijo. Za to, da se ličinke v gnezdu ustrezno razvijajo, morajo najprej matica (spomladi) in kasneje delavke v gnezdu zagotavljati primerno temperaturo, ki je malo nad 30 °C. Ko je zunanja temperatura nizka, čmrlji gnezdo grejejo z metabolno toploto. To sproščajo s hitrim krčenjem mišic, dosežejo lahko kar 20 °C višjo temperaturo kot v okolici. Ko je zunanja temperatura visoka, delavke gnezdo hladijo, tako da z mahanjem s krili ustvarjajo pretok zraka. Frekvence tega zvoka so podobne tistim pri letu. Drugi način oglašanja pa so obrambni zvoki. Ob sumu na prisotnost vsiljivca čmrlji obrambno »sikajo«, gre za visokofrekvenčno oglašanje, pri katerem vibrirajo letalne mišice, ne pa tudi krila. Raziskave so pokazale, da tako obnašanje sproži povišana koncentracija CO₂, denimo ob obisku miške, ki je pogost plenilec gnezd [6].

Kako smo poslušali čmrlje?

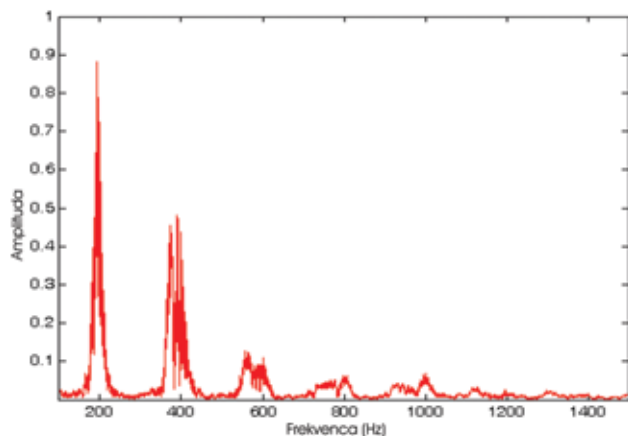
V zadnjih letih smo zvoke čmrljev preučevali v različnih scenarijih. Pobudnik raziskav je bil profesor Janez Grad, dolgoletni predavatelj na Ekonomski fakulteti in Fakulteti za upravo, ki se s čmrlji ukvarja že vrsto let. Na vrtu v okolici Ljubljane ima postavljene lesene gnezdilnice, v katere se vsako pomlad naselijo različne vrste čmrljev. Tako smo lahko spremljali čmrlje v različnih delih leta in v različnih okoliščinah.

Slika 1 prikazuje spektrograme treh tipov zvokov delavke drevesnega čmrlja (*Bombus hypnorum*). Spektrogram predstavlja časovno odvisnost Fourierove transformacije in nam omogoča spremljanje posameznih komponent zvoka. Pri letu vidimo najmočnejšo komponento pri okrog 200 Hz, nad njo so višji harmoniki, ob tem, da je vsaka naslednja komponenta šibkejša. Primer takega



Slika 1: Spektrogram treh tipov zvokov delavke čmrlja *B. hypnorum*. Prilagojeno po [7].

spektra prikazuje Slika 2. Drugi del slike prikazuje tresenje cveta – čmrlj najprej prileti do cveta (enak vzorec, kot pri letu), nato ga strese, kjer je osnovna frekvenca precej višja. Tretji scenarij, obrambno oglašanje, je bilo posneto pri čmrlju v kozarcu – ko potrkamo po kozarcu, se čmrlj ježno odzove s še višjo frekvenco.



Slika 2: Spekter zvoka tipičnega čmrljevega leta z osnovno frekvenco okrog 200 Hz.

Med študijem zvokov brenčanja smo zbrali posnetke brenčanja 11 vrst čmrljev, pri večini vrst smo zbrali posnetke tako matic kot delavk. To zbirko posnetkov smo uporabili kot bazo, na kateri smo razvili algoritem strojnega učenja za avtomatsko klasifikacijo posnetkov glede na vrsto in tip (matica ali delavka) čmrlja. Najprej smo posnetke ročno prečistili s programom Audacity. Odstranili smo dele posnetka, kjer ni bilo prisotnega brenčanja, in tiste, kjer so bili prisotni še dodatni šumi iz okolice, denimo promet. Tako smo skupaj dobili več kot 1000 segmentov v 17 razredih (vrsta in tip čmrlja). V naslednjem koraku smo s pomočjo odprtokodne knjižnice openSMI-

LE izračunali vrsto značilk (atributov) za vsak segment. Posamezna značilka je rezultat matematične operacije na posameznem posnetku. Primer značilk so koeficienti MFCC (Mel-Frequency Cepstrum Coefficient), ki temeljijo na Fourierovi transformaciji signala. Z metodo informacijskega pribitka (Information Gain) smo izbrali sto značilk, ki najbolj ločijo med posameznimi razredi.

Sto značilk smo uporabili za gradnjo klasifikacijskega algoritma, ki nato za novi posnetek določi, za katero vrsto in tip čmrlja gre (torej, razred). Uporabili smo odprtokodni program Weka (<https://www.weka.io>). Testirali smo različne tipe algoritmov strojnega učenja. Test je potekal tako, da smo bazo posnetkov razdelili na učno množico, na kateri se algoritem uči, in testno množico, na kateri potem napoveduje razrede. Običajno se tak test izvede z metodo prečnega preverjanja, kjer se baza na različne načine razdeli na učno in testno množico, skupna natančnost pa je potem povprečje posameznih poskusov. Najbolje se je izkazal algoritem Random Forest (naključni gozd). Ta algoritem temelji na odločitvenih drevesih, kjer se na vsaki razvejitvi odločimo glede na vrednost posamezne značilke. Algoritem ustvari množico takih dreves in potem primerja njihove napovedi. V našem primeru je algoritem dosegel 82,7 % klasifikacijsko natančnost (ang. *accuracy*), ta metrika je določena kot delež pravilno določenih primerov. Nekatere razrede je algoritem napovedal z natančnostjo nad 90 %, pri drugih, predvsem tistih, kjer smo imeli v učni množici manjše število posnetkov, pa je bil manj natančen [7].

V drugi študiji smo zvočne posnetke uporabili za spremljanje »prometa« čmrljev, se pravi za prihode in odhode iz panja. Avtomatsko »štetje prometa« je koristno, saj nas dolgoročno zanima, kdaj so posamezne vrste čmrljev aktivne, denimo v odvisnosti od padavin ali zunanjih temperatur. Pred panj smo postavili mikrofona, ki je več ur snemal zvok, kot prikazuje Slika 3. Mikrofona seveda

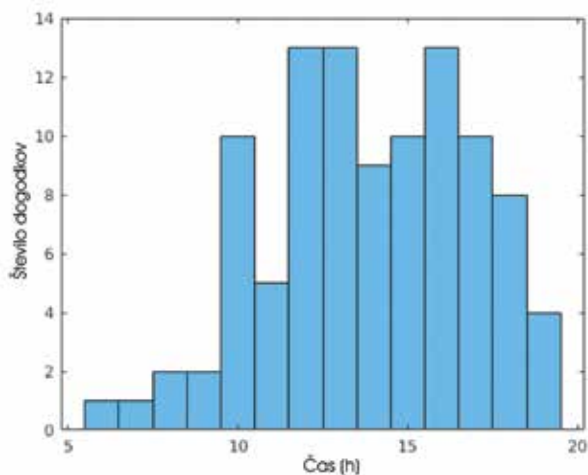
posname vse zvoke, ki ga dosežejo, poleg čmrljev tudi hrup prometa, soseda, ki se pogovarja z ženo, pa še soseda v drugi hiši, ki nekaj počne v delavnici. Občasno se oglasi tudi kakšen ptič. Iz posnetka je treba zato najprej izluščiti, kateri zvoki pripadajo čmrljem, ki letajo mimo mikrofona. Primer dveh izsekov iz posnetka je na Sliki 4.



Slika 3: Lesena panja za čmrlje, pred vhodom v levega je postavljen USB-mikrofonček.

Algoritem, ki smo ga razvili, je pravzaprav preprost. Celoten posnetek razrežemo na segmente, ki so dolgi nekaj sekund. Nato določimo najmanjšo jakost zvoka, pri kateri bi lahko šlo za prelet čmrlja. Spomnimo, mikrofoni so tik pred vhodom v panj, zato bodo preleti glasnejši od večine drugih zvokov (razen morda od občasnega avtomobila, ki se pripelje po bližnji cesti). Za vsak segment, ki je dovolj glasen, z nekaj enostavnimi pravili pogledamo, ali po strukturi ustreza brenčanju čmrlja – predvsem, ali je prisoten močan vrh pri osnovni frekvenci in šibkejši pri višjem harmoniku (kot na Sliki 2). Ta enostavni algoritem je na 12-urnem posnetku pred panjem rjavega čmrlja (*Bombus pascuorum*) pravilno določil 95 % preletov (primerjali smo z ročno analizo posnetka). Slika 5 prikazuje porazdelitev dogodkov na izbrani dan (28. maj 2018), vidimo lahko, da so bili čmrlji aktivnejši sredi

dneva, zjutraj in zvečer pa manj [8]. Poudariti je treba, da smo šteli samo prelete čmrljev, ne pa izletov posamezne delavke – za tako študijo bi jih morali posebej označiti in spremljati ročno ali s pomočjo kamere.

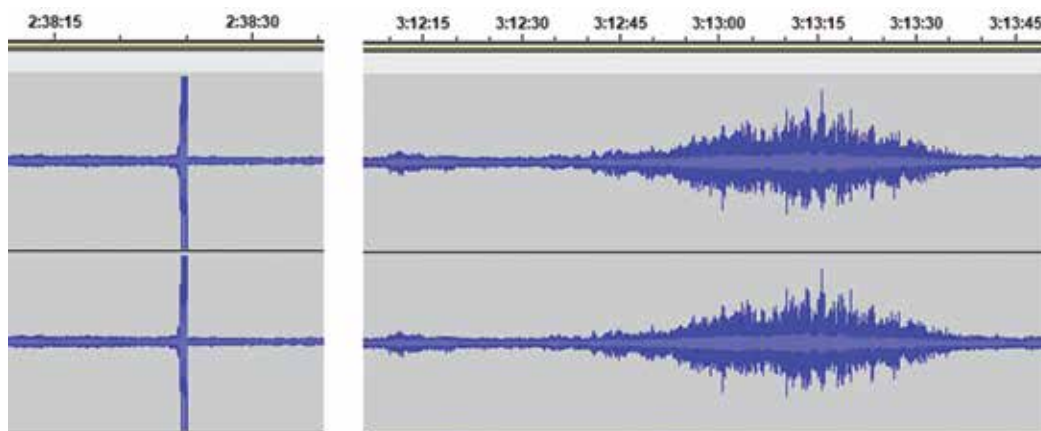


Slika 5: Urna porazdelitev preletov čmrljev *B. pascuorum* na dan 28. maja 2018.

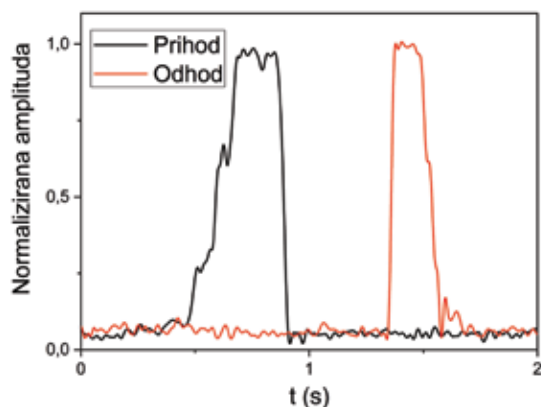
Na podlagi zvoka pa lahko ugotovimo tudi, ali je čmrlj priletel ali odletel. Fizik bi najprej pomislil na Dopplerjev pojav, kjer se frekvenca zviša, če se nam vir zvoka približuje, in zniža, če se oddaljuje. A gre tudi enostavneje, v časovni domeni. Oglejmo si envelope prihoda in odhoda, kot ju prikazuje Slika 6. Pri prihodu se jakost zvoka povečuje, saj se čmrlj približuje mikrofону. Ob pristanku amplituda hitro pade, saj čmrlj med sprehajanjem po »pisti« ne brenči. Pri odhodu je ravno obratno, čmrlj se sprehodi do izhoda iz panja, vzleti (amplituda hitro naraste) in odleti stran od panja, kar se odraža v padcu amplitude. Iz oblike signala lahko torej enostavno določimo, za kateri tip dogodka gre [8, 9].

Kaj načrtujemo v prihodnosti?

Kot smo pokazali, lahko spremljanje zvoka v panju pove marsikaj o dogajanju v gnezdu. Ugotovimo lahko, kdaj



Slika 4: Zvočna izseka (amplituda v odvisnosti od časa), pridobljena s programom Audacity. Levi posnetek predstavlja prelet čmrlja (prihod v panj), na desnem pa se med drugim slišijo ptičje petje, cvrčanje kobilic in hrup prometa.



Slika 6: Envelopi prihoda (črna) in odhoda (rdeča), obe amplitudi sta normalizirani.

so čmrlji aktivni, kaj počnejo, spremljamo pa lahko tudi, ali jih je morda obiskal vsiljivec. Dolgoročno so te ugotovitve pomembne v kontekstu razumevanja, kako podnebne spremembe vplivajo na posamezne vrste čmrljev, spremljanje zvokov pa je obetavno tudi za zgodnje zaznavanje problemov v gnezdu, denimo okužb s paraziti

ali virusi. To je pomembno predvsem pri družinah čmrljev, ki jih specializirana podjetja pošiljajo v rastlinjake za opraševanje, saj lahko tako preprečimo širjenje patogenov.

Letos in naslednje leto z Andragoškim centrom Slovenije sodelujemo pri projektu Podnebni cilji v vzgoji in izobraževanju [10], ki v kontekst vzgoje in izobraževanja za trajnostni razvoj vključuje podnebne vsebine. S pomočjo občestvene znanosti (ang. *citizen science*) se posvečamo opazovanju opraševalcev, da bi bolje razumeli njihovo povezavo s podnebjem. Več kot sto udeležencev spremlja opraševalce, ki obiskujejo sončnice. V prvem letu opazovanje poteka ročno, udeleženci beležijo, kateri opraševalci so se oglasili na cvetovih in ob kateri uri. Ker gre za udeležence, ki niso strokovnjaki, določamo opraševalce le kategorično (medonosna čebela, čmrlj, čebela samotarka, metulj, muha trepetavka, osa, hrošč, drugo) in z izjemo dobro znane medonosne čebele (*Apis mellifera*) ne določamo točne vrste. Naslednje leto nameravamo v študijo vključiti tudi mikrofone, ki jih bomo pritrdili na sončnice, pri analizi posnetkov pa bodo koristni tudi algoritmi, ki smo jih opisali v tem prispevku.

Viri

- [1] Gradišek, Anton. Ivan Regen. *Novice IJS*, dec. 2012, št. 162, str. 11–12.
- [2] Fuller, Susan, idr. „Connecting soundscape to landscape: Which acoustic index best describes landscape configuration?“ *Ecological indicators* 58 (2015): 207–215.
- [3] Nemeth, Erwin, idr. „Bird song and anthropogenic noise: vocal constraints may explain why birds sing higher-frequency songs in cities.“ *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 280.1754 (2013): 20122798.
- [4] Weilgart, Linda S. „A brief review of known effects of noise on marine mammals.“ *International Journal of Comparative Psychology* 20.2 (2007).
- [5] D. Goulson, *Bumblebees: Behaviour, Ecology, and Conservation*, Oxford University Press, 2010
- [6] Miller, Zachary J. „What’s the Buzz About? Progress and Potential of Acoustic Monitoring Technologies for Investigating Bumble Bees.“ *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine* 24.7 (2021): 21–29.
- [7] Gradišek, A., Slapničar, G., Šorn, J., Luštrek, M., Gams, M., in Grad, J. (2017). Predicting species identity of bumblebees through analysis of flight buzzing sounds. *Bioacoustics*, 26(1), 63–76.
- [8] Gradišek, A., Cheron, N., Heise, D., Galen, C., in Grad, J. (2018). Monitoring bumblebee daily activities using microphones. In *Proceedings of the 21st Annual International Multiconference Information Society-IS* (pp. 5–8).
- [9] Heise, D., Miller, Z., Harrison, E., Gradišek, A., Grad, J., in Galen, C. (2019, March). Acoustically tracking the comings and goings of bumblebees. In *2019 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)* (pp. 1–6). IEEE.
- [10] <https://www.acs.si/projekti/domaci/podnebni-cilji-in-vsebine-v-vzgoji-in-izobrazevanju/>, <https://irdo.si/irdo2022/referati/day2-2022-paper-bogataj-ok.pdf>