

Komunikacja pomiędzy zwierzętami i bioakustyczne badania nad pszczołami

ANNA TOMAŃSKA¹, PAWEŁ CHORBIŃSKI²,
MAŁGORZATA KLIMOWICZ-BODYS², PHILIP MILL³

¹Katedra Biostruktury i Fizjologii Zwierząt, Wydział Medycyny Weterynaryjnej, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, ul. Kozuchowska 1/3, 51-630 Wrocław

²Katedra Epizootologii z Kliniką Ptaków i Zwierząt Egzotycznych, Wydział Medycyny Weterynaryjnej, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, pl. Grunwaldzki 45, 50-366 Wrocław

³TELUS International AI, ul. Grzybowska 2/29, 00-131 Warszawa

Otrzymano 08.01.2024

Zaakceptowano 03.02.2024

Tomańska A., Chorbiński P., Klimowicz-Bodys M., Mill P.

Communication among animals and bioacoustics studies on bees

Summary

The communication of honey bees encompasses diverse forms, focusing on signals that resemble those in the learning process. Bioacoustics plays a crucial role in understanding this phenomenon, especially in the context of social insects, where communicative coding is complex and essential for survival. In this article, various aspects of bee communication are analyzed, examining both acoustics and other forms of information transmission.

In the bee family, there are several communication mechanisms, such as the dance of bees, vibrations, buzzing, and singing. The dance communication of honey bees, based on dance movements, dates back as far as 40 million years, making it older than human language. This form of communication is linked to environmental needs and determines the survival of bees. Signals from queen bees are associated with reproductive needs within the colony, and other individuals exhibit diverse sound characteristics. Different species of bees utilize various aspects of the environment for communication, including gravity and the position of the sun. The precision of transmitted signals may depend on the distance to a food source or potential threat. Sounds emitted by bees serve diverse functions, such as deterring predators or recruiting other individuals for food collection.

Modern technologies, especially bioacoustics, enable more precise studies of bee communication. Advanced methods of vibrational spectrum analysis even allow the prediction of swarming with high effectiveness, which can be particularly useful in beekeeping practices. Studies on the bioacoustic hive, utilizing stereo microphones and soundproofing, indicate the potential of these technologies for a better understanding of bee communication in natural conditions. However, many aspects of bee communication still require more detailed research, such as the role of honey-filled cells in transmitting vibrations, necessitating the use of precise tools and technologies. The bioacoustic hive project, based on traditional bee frames, provides new insights into bee communication, especially concerning sounds generated during bee collisions within the hive.

Conclusions from bioacoustic studies have significant practical potential in apiculture. The use of stereo microphones and soundproofing improves the perception and assessment of acoustic phenomena within the hive. Prospects for utilizing sound recorders for continuous monitoring of life inside the hive, and the assessment of zoo-hygienic conditions, underscore the growing importance of bioacoustics in beekeeping practices. These discoveries open new perspectives for research into the social life of these crucial insect species and their conservation.

Keywords: bioacoustics, beekeeping, communication, social insect

Wstęp do badań bioakustycznych

W królestwie zwierząt istnieje różnorodność form porozumiewania się, które określane są przez zoosemiotyków mianem sygnałów. Komunikaty te, są przekazywane pomiędzy poszczególnymi organizmami, jak i między grupami zwierząt. W przypadku zwierząt,

sygnały te zazwyczaj przybierają formę rywalizacyjną. Mogą one być co najwyżej idiomatyczne oraz co najmniej impulsywne i fonotaktyczne; audytoryjne i niesyntetyczne. Same komunikaty, zawierające substrat, obiekt i konstrukt znaku w relacji do subiekta, pełnią funkcje instrumentalne i motywacyjne. Niezależnie

od ich kwalifikacji wiadomo, iż sama liczba sygnałów stanowi ograniczony zbiór kodów, jednak liczba sygnałów-okazów jest o wiele większa, co zwiększa repertuar przekazywanych informacji. Na przykład, u małych człekokształtnych wokalizacja jest dodatkowo uzupełniana gestykulacją, co prowadzi do zastosowania kilku warstw kodów komunikacji (jest to kod poliklasowy) (48). Ich komunikację charakteryzowano reakcjami wywoływanymi sygnałami, co przyczyniło się również do logicznej analizy języka człowieka.

Wśród sygnałów wykorzystywanych przez zwierzęta wyróżnia się identyfikatory, desygnatory, oceniacze i preskryptory. U zwierząt najwięcej informacji ma charakter desygnacyjny, obejmujący podkategorie: informacji gatunkowej, płciowej, indywidualnej, motywacyjnej i środowiskowej. Często pojedynczy sygnał koduje kilka informacji (40). Niekiedy badacze odchodzą od posługiwania się samym terminem „informacja” na rzecz „manipulacji sygnałami” (63). Niektórzy kwestionują również restrykcyjną dychotomię pomiędzy sygnałami emocjonalnymi a referencyjnymi, uznając, że efekt zachowania słuchacza nie musi być jednoznacznie warunkowany. Mimo to podkreśla się, że zdobywanie wiedzy o otoczeniu, kodowanej poprzez komunikację, przypomina proces uczenia się, a dobór naturalny faworyzuje organizmy, które wokalizują informacje korzystne dla odbiorców, wywołując u nich adekwatne reakcje (63).

Kanałem propagacji wokalizacji, który umożliwia wielokierunkową analizę kodu większości gatunków zwierząt, jest fala akustyczna. Badania bioakustyczne przeprowadzane zarówno w środowisku naturalnym, jak i w formie eksperymentu laboratoryjnego, mają na celu zgłębienie naukowego sensu fal dźwiękowych oraz zrozumienie języka zarówno ludzi, jak i zwierząt. Również ścieżki dźwiękowe natury coraz częściej odnajduje się w przestrzeni sztuki. W różnych aspektach i dziedzinach, poprzez badanie biokomunikacji, organizmom przypisuje się pewne cechy, które nadają im rolę partnera w komunikacji (62). Do ich rozpoznawania służy percepcja, nadająca ton interpretacji otaczającego świata. Percepcja jest rezultatem zbioru wrażeń dźwiękowych, a w domenie audytywnej to same organizmy są zdolne do wydawania dźwięków (69).

Efekty fizjologiczne takich sygnałów stają się coraz lepiej poznane, obejmując nie tylko same zachowania, lecz również obserwowane są zmiany parametrów fizjologicznych wobec dźwięków (muzyki) (65). Rosnące zainteresowanie tym problemem sprzyja powstawaniu nowych specjalizacji, takich jak społeczna psychologia muzyki, która bada społeczne aspekty muzyki, jej percepcję i wpływ dźwięków na relacje społeczne (34). Rozumienie komunikacji w królestwie zwierząt jest istotne, ponieważ może przynieść liczne korzyści zarówno w kontekście poznawczym, jak i praktycznym. Już dziś dokładnie poznano pozytywne oddziaływanie fal dźwiękowych na rozwój płodu, poprzez zwiększoną proliferację jego komórek mózgo-

wych, czy rolę hałasu, który może obniżać zdolności zapamiętywania i prowadzić do agresji u dorosłych (26). Pogłębienie wiedzy na temat urozmaicenia dźwiękowego może sprzyjać lepszemu zrozumieniu przyrody, a sama dźwiękowa stymulacja może znaleźć coraz więcej celowych zastosowań (30).

W bioakustyce można wykorzystywać wiele metod i technik pracy (42, 53). Analiza zebranych danych może stanowić łącznik pomiędzy obserwacją zjawisk biologicznych i fizycznych, bazować na modelowaniu matematycznym (15), wykorzystując też sztuczną inteligencję (8). Materiałem tych badań są próbki bioakustyczne, wobec których można zastosować różnorodną analizę wskaźników (54). Określa się zatem wielkości, jednostki i zależności między nimi (76). Podstawą badań biokomunikacji jest ustalenie, czy organizmy w ogóle się porozumiewają, kiedy to się dzieje, jak często, czy relacje te zmieniają się na przestrzeni czasu, a nawet czy możliwe jest ich odtworzenie w kontekście ewolucyjnym (10). Ponadto, istotne jest przypisanie tym interakcjom sensu, który ma znaczenie dla ludzi w kontekście badania komunikacji o charakterze lingwistycznym zwierząt (41).

W przypadku zwierząt, czerpiąc z akustyki medycznej, poszukuje się współczynników fizjologii emisji dźwięku oraz możliwości i zakresu percepcji (12). To obejmuje także analizę ścieżek przewodzenia neuronalnego – od receptora, poprzez drogę w ośrodkowym układzie nerwowym, aż do efektora – służąc nie tylko poznaniu neuroetiologii i neuropsychologii (60), ale dając wgląd w anatomię funkcjonalną organizmów w kontekście ich zmysłów i zachowań. Udostępnienie takich wyników badań podstawowych umożliwia wdrożenie metod komparatystycznych (22), co poszerza perspektywę w polemice o znaczeniu komunikacji w królestwie zwierząt, filogenezie (z wykorzystaniem danych wielowymiarowych) (50), a nawet ochrony gatunkowej (70). Tym samym dźwięk emitowany przez zwierzęta jest użytecznym parametrem biometrycznym (64). Inżynieria dźwięku znacząco rozwija metody rejestracji tych danych (w przypadku zastosowań przyrodniczych przybiera formę „monitoringu”) (29), a dane te są coraz częściej gromadzone jako kolekcje w archiwach dźwiękowych (5). Prowadzenie badań bioakustycznych wymaga interdyscyplinarnego podejścia opartego na danych dźwiękowych, łącząc je z naukami biologicznymi (75). Bioakustyka stoi więc na fundamentach biologii i fizyki, w szczególności zagadnienia ruchu falowego (43).

Fala dźwiękowa jest lokalną przemianą adiabatyczną. Rozchodzi się w ośrodku w postaci rozrzedzeń i zagęszczeń cząsteczek. Prędkość rozchodzenia się fali zależy od masy molowej cząsteczek gazu (ośrodka) oraz temperatury. W przypadku środowiska wodnego gęstość odgrywa kluczową rolę, nadając fali charakter podłużny, zazwyczaj osiągając większą prędkość. Dodatkowo, dla tej samej temperatury fala szybciej rozchodzi się w wodzie słonej niż słodkiej (56).

W obu przypadkach różnice gęstości są proporcjonalne do zmian ciśnienia, określanego jako ciśnienie akustyczne (49).

Wokół pojęcia dźwięku podjęto szereg dywagacji. Przedstawienie jego definicji fizycznej jest najwłaściwsze, jednak należy odróżnić cechy dźwięku dla różnych jego jednostek leksykalnych, dlatego dla dźwięku jako tonu muzycznego określa się wysokość, natężenie i barwę, zaś dla fonii – dźwięku w programie komputerowym, wyznacza się też to, co towarzyszy obrazowi, np. efektów dźwiękowych zapisanych w postaci spektrogramu (81). Cechami dźwięku są przede wszystkim: częstotliwość, określona wysokością (głośnością), barwa i ton. Dotychczasowe osiągnięcia bioakustyki przyczyniły się do wyłonienia ważnych zasad teoretycznych. W procesach komunikacji ważne są cztery zasady: hipoteza adaptacji morfologicznej (the morphological adaptation hypothesis, MAH), hipoteza adaptacji akustycznej (the acoustic adaptation hypothesis, AAH), hipoteza niszy akustycznej (the acoustic niche hypothesis, ANH) i hipoteza rozpoznawania gatunków (the species recognition hypothesis, SRH). Opisują one zależności: rozmiar ciała jest skorelowany z biologicznym ograniczeniem narządów służących do wokalizacji i ich właściwości akustycznych (istnieje odwrotna zależność między częstotliwościami akustycznymi a rozmiarem ciała zwierzęcia); środowisko wywiera wpływ na modyfikację i zmianę sygnałów akustycznych (częstotliwość i struktura kodu dźwiękowego są plastyczne i zależne od ograniczeń środowiska); każdy gatunek ma unikalną przestrzeń akustyczną, w której tworzy specyficzną gatunkowo sygnaturę dźwiękową i dzięki czemu optymalizuje mechanizmy komunikacji wewnątrzgatunkowej; współwystępujące obok siebie gatunki znacznie różnią się repertuarem dźwiękowym (zmniejszając tym samym konkurencję reprodukcyjną i zapobiegając hybrydyzacji) (14).

Podczas analizy danych bioakustycznych korzysta się z aparatury, która już na etapie rejestrowania dźwięku przygotowuje ścieżkę dla specjalistycznego oprogramowania. Mikrofon odgrywa tu kluczową rolę, ponieważ jego czułość umożliwia precyzyjne przekształcanie zmian ciśnienia fal akustycznych na sygnał elektryczny (55). To pozwala znacznie poszerzyć zakres percepcji, umożliwiając uwidocznienie fal, które są poza zakresem słyszalności dla człowieka, ale którymi posługują się zwierzęta, takie jak nietoperze (37) czy słonie (71). Takie podejście nadaje badaniom mocny kontekst naukowy, przekraczając granice subiektywnej oceny dźwięku. Człowiek, korzystając z ograniczonej gamy zmysłów, nie jest w stanie w pełni analizować całego spektrum fal dźwiękowych (46) bez użycia technologii, jednak mając możliwość wielotorowej oceny danych komputerowo, opracowuje się protokoły, które zapewniają badaniom zaplanowany charakter, skupiony na uzyskaniu wyników o wysokiej jakości (32).

Rozwój narzędzi bioakustycznych oraz osiągnięcia w dziedzinie badań nad komunikacją skłaniają niektórych badaczy do rozważań nad istnieniem „kodu językowego”, wspólnego dla człowieka i zwierząt, który mógłby umożliwić nawiązanie interakcji na zasadzie antropomorficznego dialogu. Dzięki takim dążeniom udało się już zarejestrować kilka tysięcy gestów u szympanów, z czego wiadomo, że większość z nich jest używana intencjonalnie (23). Według Darwina, potrzeba komunikacji występuje też ze strony zwierząt w stosunku do ludzi. Zauważył on, że wilki wychowywane w obecności człowieka uczą się naśladować szczekanie psów (9). Komunikacja u zwierząt jest niezwykle złożona, opiera się na różnorodnych sygnałach i wykorzystuje różne mechanizmy kodowania specyficznego języka, który jest biologicznie użyteczny. Środowisko, w którym ewoluują zwierzęta, ma istotny wpływ na rozwój ich zdolności komunikacyjnych. U ssaków żyjących na lądzie, ukształtowały się w wyniku tego mechanizmy wzmocnienia odbieranych dźwięków. Dla kręgowców charakterystyczny jest narząd przedsionkowo-ślimakowy. U owadów, choć ich budowa anatomiczna różni się od kręgowców, również istnieją wyspecjalizowane narządy zmysłów odpowiedzialne za równowagę i słuch (39). Analizując dotychczasowe obserwacje komunikacji pszczół, biorąc pod uwagę nowoczesne osiągnięcia bioakustyki i mając świadomość złożoności sygnałów komunikacyjnych u zwierząt, należy ponownie rozważyć sens komunikacji w przypadku gatunku *Apis mellifera*.

Komunikacja pszczół i innych owadów społecznych

W swoich wykładach poświęconych *Tajemnicom pszczół* Rudolf Steiner zawarł interesujące informacje, jakoby pszczelarz był rozpoznawany przez swoje pszczoły, które miały reagować na jego obecność. Po śmierci swego właściciela, według Steinera, są one skłonne do chorowania, a nawet giną. Jego teorie zostały podważone z punktu widzenia aktualnej zoologii, jednak w okresie przypadającym jego twórczości treści te były bardzo inspirujące, a dziś uważa się go za jednego z ojców antropozofii. Opisał relację pszczelarza z pszczołami, porównał ją do przyjaźni między ludźmi: „Powiedzmy, że macie przyjaciela, którego poznaliście w roku 1915 (...), a wy jedziecie do Ameryki i wracacie w roku 1925. (...), Materia, substancja, która jest w ludzkim ciele, w ciągu siedmiu lat zostaje całkowicie wymieniona (...). Tak więc przyjaciel, gdy widzicie go ponownie po 10 latach (...) nie ma w sobie nic z tej materii. A jednak go rozpoznaliście. (...) wygląda on tak, że stanowi powiązaną ze sobą masę. (...) Gdybyście oglądali go przez wystarczająco duże szkło powiększające, to widzielibyście, że do jego głowy wpływa naczynie krwionośne. (...) to, co płynie jako krew, wygląda tak jakby składało się wyłącznie z punkcików przypominających małe zwierzęta. Lecz te punkciki nie pozostają w spoczynku, one nieustannie drgają. I gdy to widzicie, to jest tam niesamowite

podobieństwo do unoszącego się w powietrzu roju pszczół!” (67). Pomijając kwestie aktualnej wiedzy biologicznej, nie można jednoznacznie stwierdzić, czy filozofia Rudolfa Steinera wynikała jedynie z jego wewnętrznego świata przeżyć, czy też opierała się na obserwacjach. Steiner łączył swoje idee ze sferą duchową, co jest charakterystyczne dla antropozofii, ale trudno jest jednoznacznie określić, jakie źródła wpłynęły na jego teorie.

W kontekście wspomnianej literatury można poszukiwać zaczątków teorii biokomunikacji pszczół, z którymi Steiner mógł być zaznajomiony. Interpretowanie rozpoznawania pszczelarza przez pszczoły jako reakcji na obopólne sygnały z drgań jest ciekawą hipotezą, choć trudno znaleźć naukowe potwierdzenie tego pomysłu w świetle obecnej biologii. Warto podkreślić, że interpretacje i teorie Steinera są często traktowane jako elementy antropozofii, której podstawy opierają się na duchowej wizji świata. Mimo, że jego idee nie zawsze znajdują poparcie w naukowych badaniach, mają one swoje miejsce w historii myśli filozoficznej i stanowią część dziedzictwa kulturowego. Współcześnie za nawiązywaniem kontaktu pszczół z pszczelarzem podczas zagrożenia w pasiece opowiada się Siudalski (52). O swobodzie komunikacji pszczół z ludźmi napisał, w oparciu o swoje badania etnograficzne Gliński (17). Zdarza się, że sami pszczelarze uważają, że nawiązują relację z pszczołami, co określają jako podobną do tej, którą są zdolni tworzyć ze zwierzętami towarzyszącymi (72). Interesującym przypadkiem jest praca w pasiece niewidomej kobiety, która zdolna jest do audytywnej oceny życia rodzin pszczelich w pasiece (21). Jej umiejętność rozróżniania odmiennych dźwięków w zależności od stanu zdrowia pszczół czy umiejscowienia pyłku w okolicy ula stanowi niezwykle przykładową adaptację zmysłów człowieka. Odróżnianie dźwięków związanych z różnymi aspektami życia pszczelej społeczności, takimi jak zdrowie pszczół, stanowi unikalny sposób komunikacji między człowiekiem a pszczołami (21).

Owady społeczne wyróżniają się różnorodnymi zachowaniami i zależnościami międzyosobniczymi oraz tymi związanymi ze środowiskiem. Posiadają one te zdolności dzięki temu, że uczenie się stanowi u nich krytyczny modulator procesów komunikacyjnych, umożliwiając przenoszenie informacji o indywidualnych doświadczeniach do swojej społeczności, działając na korzyść całej społeczności (19). Sygnały drgań oraz wizualne są łatwo modulowane, cechują się elastycznością wytwarzania i szybkością transmisji, co sprawia, że najczęściej są wykorzystywane do komunikacji tożsamości gatunkowej, związanej z rozmnażaniem, ochroną, opieką nad potomstwem i dzieleniem się informacjami o środowisku (78). Oprócz tego, owady posiadają rozbudowany system posługiwania się feromonami, wykorzystują zmienne barwy i fluorescencję. Relacje społeczne u pszczół są opisywane także w kontekście występujących po sobie

reakcji chemicznych obejmujących substraty i produkty (3). Mechanizmem sterującym relacje społeczne u pszczół są systemy znaków zapachowych (36).

Biologiczne mechanizmy zachowań zwierząt opierają się głównie na ich zdolnościach sensorycznych, wykorzystując nie tylko wyspecjalizowane narządy, lecz także bardziej złożone i subtelne struktury anatomiczne oraz fizjologiczne. U pszczoły układ nerwowy reprezentują komórki zebrane w zwoje, które łączą się między sobą pasemkami i układają w łańcuszek brzuszny. Tym samym wyróżnia się: zwoje głowowe, tułowiowe i odwłokowe. Na wewnętrznej stronie goleni pierwszej pary odnóży znajduje się narząd chondrotonalny w postaci rozpiętych strun. U niektórych owadów wykazano w tym miejscu także twory przypominające błony bębenkowe, dlatego przez długi czas podejrzewano, że może to być narząd słuchu pszczoły (20). Niewątpliwie jest to narząd słuchu, ponieważ pozwala na skuteczne odbieranie różnych natężeń drgań. Od głównego łańcucha nerwowego odchodzą nitki nerwowe we wszystkie części ciała, tworząc mniejsze zwoje, które pod względem budowy chemicznej są analogiczne do nerwów kręgowców. W XIX w. postawiono hipotezę o istnieniu narządu słuchu u pszczoły. Rosenthal opisał go jako „staw różka”, a Clark jako „uszy”. Opisano go jako kulisty pęcherzyk z otworami, przez które przenikają fale dźwiękowe. Do wzmacniania dźwięku mają służyć dalej położone elementy tego układu, osadzone na stawie jako sprężyste pręciki. Według tych autorów, pszczoły cechuje dobrze rozwinięty słuch. Niektórzy z nich łączyli opisane struktury ze zmysłem dotyku i powonienia, podkreślając, że samice/robotnice, zostały wyposażone w większą ilość receptorów, co jest niezbędne do pełnionych przez nie różnorodnych funkcji zgodnych z polietyzmem wiekowym (16). Ci sami autorzy podjęli próbę zapisu zdolności akustycznych pszczół, obserwując, że wachlując skrzydłami i trąc o siebie poszczególne części ciała, te owady są zdolne do generowania dźwięków przypominających chrzęsty. W ramach tych badań podjęto próbę zapisu tych dźwięków na pięciolinii, przypisując inny zestaw dźwięków królowej i robotnicom (ryc. 1) (17).



Ryc. 1. Nuty muzyczne przypisane matkom pszczelim wg Fuckel (1874), [w:] *Anatomia pszczoły...* Opracowane przez: Autor

Badania narządów chondrotonalnych zostały przeprowadzone u różnych owadów, a szczegółowy opis przypada pszczołom – opisano u nich narząd Johnsona. Jest on zlokalizowany w drugim członie czułka. Oprócz

odbierania wrażeń słuchowych, ten narząd przekazuje dodatkowe informacje, umożliwiające między innymi dekodowanie sygnałów płynących z tańca pszczół. W jego trakcie cząsteczki powietrza drgają z dużą amplitudą prędkości. Czułki pełnią wiele funkcji związanych z siedmioma zmysłami; należy zatem podkreślić, że nie wszystkie włosy mechanoreceptywne głowy odpowiadają za odbieranie dźwięków. Za tę funkcję odpowiedzialne są pedicelle, włosy umieszczone na drugim członie czułków (11). Pszczoły zostały poddane licznym badaniom, obejmującym m.in. obcinanie jednego lub obu czółek oraz skracanie ich członów. Te eksperymenty pozwoliły zaobserwować współmierną utratę zdolności powonienia. Potwierdzono również, że zmysł słuchu u pszczół znajduje się na odnóżach i obejmuje opisaną błonę bębenkową, zdolną do odbierania drgań o różnej częstotliwości (2). Pomimo początkowych trudności w identyfikacji narządu słuchowego u pszczół, udowodniono, że są one zdolne do słyszenia i reagowania na drgania powietrza oraz przedmiotów, negując ówczesne przekonania, że owady te są głuche (7). W ogólnym ujęciu komunikacja wśród pszczół zachodzi przy wykorzystaniu wielu zmysłów, na różnych poziomach organizacji.

Za same badania nad tańcem pszczół Karol von Frisch otrzymał w 1973 r. nagrodę Nobla. Językoznawcy określili „taniec pszczół” jako złożone sygnały, semantyczne, podkreślając, że potoczne rozumienie „języka” typowego dla człowieka jest zupełnie odmienne od tego, który występuje u pszczół (45). Słuchanie dźwięków pszczół wymagało uzyskania zapisu pasma wykraczającego poza zakres słyszalny dla człowieka. Początkowe badania przeprowadzono, nasłuchując pszczół w drewnianych lub papierowych klateczkach. W roju pszczół dźwięki można usłyszeć gołym uchem, a pierwsze wzmianki na ten temat pochodzą od Arystotelesa.

Roman (59) usystematyzował tańce pszczół ze względu na ich funkcje, obejmujące m.in. tańce alarmowe, werbunkowe, rojowe, masujące i oczyszczające. Różnią się one w zależności od sytuacji, takiej jak opuszczanie gniazda przez rój (rojenie), ostrzeganie o zanieczyszczonym nektarze czy potrzeba pomocy przy sprzątaniu plastrów. Przy pomocy tańca pszczoły potrafią wskazywać sobie nawzajem drogę do pożytków, werbować się i ostrzegać przed zagrożeniami. W przekazywaniu tych informacji również bierze udział nie tylko wibracja, ale narząd węchu i wzroku. Pszczoły, przekazując informacje poprzez tańce, wykonują specjalne układy okrążeń, zmieniając kierunek, co powtarzają podążające za nimi osobniki. W ten sposób zbieraczki przekazują sobie dane dotyczące, położenia roślin poużytkowych. W tańcu istotną rolę odgrywa także poruszający się odwłok. Dokładność lotu do wskazanego celu zależy m.in. od kąta padania promieni słonecznych, co pszczoły wykorzystują również, aby powrócić do ula (20). Nie jest jednak w pełni zrozumiane, w jaki sposób między trutniami zachodzi

przekazanie informacji dotyczących umiejscowienia trutowiska. Wiadomo, że za koordynację miejsc trutowisk odpowiada komunikacja feromonowa dalekiego zasięgu, leżąca nie tylko po stronie matki pszczoły ale i samych trutni. W mózgu trutnia istnieje kilka dróg neuronalnych odpowiedzialnych za ekspresję receptorów węchowych związanych z rozmnażaniem (38). Dźwięk także może odgrywać tu dużą rolę ponieważ odnotowano specyficzny zakres częstotliwości w miejscu zgromadzenia trutni, co wymagałoby dalszych obserwacji u poszczególnych gatunków (31).

Dalsze badania przyniosły liczne interesujące obserwacje. Zastosowano generator drgań, naśladujący te, które naturalnie wytwarzane są przez matkę pszczoły. Pszczoły robotnice reagowały na ten bodziec; miało to też wpływ na niewygrzyzione z mateczników potencjalne konkurentki do roli matek. Dzięki rejestracji ultradźwięków zaobserwowano „niemy śpiew masy pszczół, które przyleciały na podkarmiaczkę z miodem, i przywabiające sygnały pszczół tłoczących się u wejścia do ula i na desce przedwylotowej, a nawet sygnały lotu, które podaje lecąca pszczoła” (7). Kolejne badania skupiły się na aktywności pszczół w zależności od pory dnia. W nocy prowadzono obserwacje owadów pomalowanych farbą fluorescencyjną. Okazało się, że w ulu panuje ciągły ruch i „hałas”. Ponadto, niektóre z czynności, takie jak karmienie, czyszczenie czy budowanie plastrów, wykonywane są o określonych porach dnia (7). A w nocy część pszczół śpi (27, 28).

W zachowaniu pszczół ich role społeczne i rozmieszczenie w ulu stanowią o pewnym porządku funkcjonowania roju. Niemniej jednak, w dotychczasowych badaniach konieczne jest precyzyjne określenie czy obserwacje dotyczą zachowań indywidualnych, czy grupowych, co wymaga zastosowania odpowiednich metod i technik badawczych. Warto zaznaczyć, że w historii naturalnej wielokrotnie toczyły się spory dotyczące tego, czy pojedyncza pszczoła miodna stanowi coś bez swojej rodziny, a także podkreślano, że cała rodzina stanowi spójny organizm. W przypadku obserwacji indywidualnych osobników możliwe jest skoncentrowanie się na badaniu poszczególnych ról w rodzinie pszczoły, na przykład królowa, pełniąca kluczową funkcję, czerwi w określonych obszarach plastra, poruszając się okrężnie i poszerza zasięg składanych jaj. W momencie śmierci królowej/matki w społeczeństwie pszczół tworzy się popłoch. Według Chalifman (7), pszczoły zaczynają „biegać po mostku i po zewnętrznych ścianach ula (...). Przez cztery–pięć godzin od chwili straty matki biegnące pszczoły tworzą istny potok (...) płyną po plastrze popędzając się lekkim machaniem trzepoczących skrzydeł (...). Zaledwie jednak matka wyjdzie z matecznika, często już ruch pszczół u wylotu bywa oznaką, że porządek w rodzinie został przywrócony. Wydaje się nawet, że pszczoły w ulu brzęczą weselej”. Młodej, wygrzyzionej matce przypisuje się zdolności „śpiewania”¹. Jej wołanie, a czasem klótnie i zastraszanie dojrzałych

¹ W literaturze opisywane także jako: titanie, kwakanie.

już samic w pozostałych matecznikach uniemożliwia im w tym czasie wygryzienie. Królowa po swoistych narodzinach zaczyna intensywnie biegać po plastrach żądłac rywalki, również przysiadając wprawia w drgania przetchlinki. Rezonujący w matecznikach dźwięk jest odbierany przez matki w matecznikach, te zaś odpowiadają na przekazywane im informacje (ich dźwięki są bardziej głuche) (6).

Zjawiska akustyczne towarzyszą także czynnościom związanym z termoregulacją w rodzinie pszczolej, przemieszczaniu się kłębu czy dojrzewaniu matki. Dojrzewająca matka jest centralnym punktem zainteresowania pszczoł karmicielek. Po zamknięciu komórki matecznikowej, pszczoły monitorują ściśle warunki wychowu matki, w tym czasie dogrzewają i wietrzą matecznik – przy tym wprowadzają własne ciała w drgania oraz poruszają skrzydłami w ten sposób wytwarzając ciepło (7). Zakończenia nerwowe, w tym receptory ciepła i zimna, kontaktują się ze środowiskiem zewnętrznym za pośrednictwem drobnych kanalików w chitynowym szkielecie zewnętrznym (20). Stwierdzono nawet aktywność bioelektryczną w mózgu, wskazującą na obszary związane z termoregulacją, które są aktywowane przez neurony termowrażliwe. Utrzymywanie optymalnej temperatury (heterotermiczności pszczoł) jest kluczowe dla efektywności procesów biochemicznych, co stanowi istotny czynnik przetrwania rodziny pszczolej. Metabolizm owadów funkcjonuje inaczej niż u zwierząt kręgowych, a właśnie u pszczoł duże znaczenie w jego utrzymaniu pełni termoregulacja behawioralna, związana z zachowaniem grupy, takim jak zespołowe drżenie i zmiany pozycji poszczególnych osobników oraz całej rodziny. Pszczoła utrzymuje względnie stałą temperaturę ciała, jednocześnie dbając o warunki termiczne wewnątrz gniazda. W spoczynku pszczoły wykorzystują termogenezę drzeniową, a ich mięśnie osiągają średnią temperaturę 36,5°C. Stała temperatura warunkuje sprawny pracę układu nerwowego. Podczas podtrzymywania ciepła istotne jest także schładzanie mózgu, który jest wrażliwy na przegrzanie. Proces utrzymania równowagi termicznej jest dopasowywany do aktualnej sytuacji w roju, takiej jak obecności czerwii czy wieku osobników. W organizmach pszczoł występuje mechanizm przeciwno kierowanego wymiennika ciepłego, a pętle aorty stanowią czynną powierzchnię wymiany energii cieplnej, dlatego też niektórzy określają rój jako „stałocieplny superorganizm”. Pszczoły modyfikują kształt kłębu oraz indywidualne pozycje w nim, aby dogrzewać centralną jego część i zapobiegać wychłodzeniu robotnic znajdujących się w wierzchnich warstwach (18).

Innym zagadnieniem jest chłodzenie gniazda, które jest osiąganego poprzez zmiany położenia pszczoł na plastrach, wachlowanie skrzydłami oraz przynoszenie wody do ula. Temperatura roju musi utrzymywać się w przedziale optimum termicznego od 20°C do 36°C (19, 68).

U niektórych owadów kwiaty pełnią rolę uzupełniającą w systemie komunikacji. Istnieje teoria sugerująca, że kwiaty mogą stanowić łącznik i uzupełniać braki w możliwościach komunikacji między łusko-skrzydłymi motylami a roślinami. Pszczoły, poprzez intensywne drgania, potrafią wzbudzać kwiaty do emisji substancji zapachowych, dzięki czemu wiedzą, czy lecąc do rośliny, uzyskają z niej pokarm (25).

Badania Tautza (47), podkreślają rolę plastra złożonego z heksagonalnych, równoramiennych komórek w komunikacji pszczoł. Stanowi on doskonałe tło akustyczne, zbudowane z wosku, a cała konstrukcja dobrze przewodzi drgania. Być może pszczoły są świadome zasięgu wytwarzanych drgań i zdolności podłoża do ich tłumienia, na co może wpływać stopień wypełnienia komórek miodem. Teoria Steinera, wykorzystywane przez zwierzęta dźwięków mechanicznych powstałych na skutek uderzenia o podłoże zostało szeroko udokumentowane u zwierząt, np. ptaki podczas tokowania szurają o ziemię piórami (13). Być może taniec pszczoł nie jest związany tylko z tworzeniem okręgów i drgań powietrza, a kluczowe znaczenie ma owe charakterystyczne tupanie, jego rytm i drganie podłoża. Ta kwestia nie została zbyt dobrze poznana, ponieważ wymaga precyzyjnych urządzeń, a sens komunikacji najlepiej zachowany jest w samym gnieździe, w którym ilość sygnałów jest wielokrotniona liczbą osobników i trudna w rejestracji. Takie sygnały wibracyjne przenoszone przez podłoże opisano u innych gatunków owadów, a rozwój technologii umożliwiający rejestrację zdarzeń na mikroskalę przyczynił się do lepszego zrozumienia tego zjawiska. Model komunikacji wibracyjnej znaleziono między innymi u *Nezara viridula* (L.) (Hemiptera: Pentatomidae). Badania u tych gatunków wykazały, że sygnały wibracyjne mogą stanowić użyteczne narzędzie do rozwiązywania problemów taksonomicznych (80).

Badanie złożoności indywidualnych interakcji wymaga zapamiętania, że różnice częstotliwości drgań pomiędzy organem, który wytwarza dźwięk, a zakresem fal odbieranych przez narządy zmysłów mogą się znacznie różnić. Wrażliwość zwierząt na wyodrębniony, poznany zakres fal wykorzystuje się w reakcjach warunkowania odruchów. To podejście pozwala sprawdzić, czy zwierzę, które nie reaguje na bodziec, w rzeczywistości go ignoruje lub czy bodziec do niego wcale nie dociera. Analizując wybrane fragmenty naturalnych dźwięków, można określić ich efektywny poziom ciśnienia akustycznego (13). To umożliwia przeprowadzanie badań nad reakcjami pszczoły na bodźce akustyczne w warunkach laboratoryjnych.

Badania nad komunikacją pszczoł

Komunikacja taneczna była powszechna na świecie znacznie wcześniej niż zaczął istnieć językowy kod człowieka. Stwierdzono, że może być starsza nawet niż rodzaj *Apis* sam w sobie, ze śladami sięgającymi

40 milionów lat. Jest to cecha charakterystyczna dla pszczoł, która odróżnia je od innych owadów, łącznie z osami żądłówkami, od których oddzieliły się w procesie ewolucji, datowanym na około 140-110 milionów lat temu. Specjalizacja tańca może być skorelowana z potrzebami środowiskowymi wynikającymi z ekologii, ruchu i migracji pszczoł, wskazując na miejsce nowego osiedlenia, na przykład w kierunku zróżnicowanej roślinności, charakterystycznej dla Eurazji. Zaobserwowano to u wszystkich gatunków pszczoł na świecie. Rozkład pożywienia jest dla nich kluczowym czynnikiem przestrzenno-czasowym (33). Inna teoria sugeruje, że sygnały królowych u pszczoł mogą być związane z potrzebami reprodukcyjnymi pszczoł samotniczych. Sygnały płodności mogą być produkowane jako produkt uboczny aktywacji jajników albo też spełniać inne cele komunikacyjne, takie jak rozpoznawanie partnera czy regulacja składania jaj (51). Należy wziąć pod uwagę, że większość pszczoł musi być wspierana przez grawitację podczas komunikacji, ponieważ jej brak przerywa proces interpretacji informacji przestrzennej. Korzyści z tego rodzaju komunikacji zależą także od pory roku. Nie wszystkie pszczoły wykorzystują pozycję słońca do ustalania kierunków wskazywanych przez taniec. Pszczoły korzystające z danych o grawitacji w swoich ciemnych ulach, takie jak *A. mellifera*, *A. nigrocincta*, *A. cerana* i *A. nuluensis*, również emitują sygnały dźwiękowe (57). Przeprowadzono porównania między różnymi gatunkami pszczoł pod względem komunikacji tanecznej. Stwierdzono, że taniec jest niedokładny, a pszczoły potrafią dostosować się do interpretacji w pewnych granicach błędu. *A. florea* tańczy na powierzchniach poziomych i orientuje się za pomocą grawitacji. *A. mellifera* korzysta zarówno z grawitacji, jak i położenia słońca. Największa zmienność w precyzji tańca została wykazana, gdy źródło pożywienia było blisko ula. Wyjątkiem jest *A. mellifera*, u której precyzja wskazania poprzez taniec pożytku maleje wraz ze wzrostem odległości (1).

Ponieważ taniec pszczoł był dotąd najbardziej badany, skoncentrowano się również na dźwiękach wydawanych przez te owady. Inne owady, które nie tańczą, wykształciły dobrze znane metody komunikacji akustycznej, jak na przykład bezżądłówki. Społeczne osy *Paravespula germanica* i *Vespa orientalis* wykorzystują rozwiniętą komunikację dźwiękową. W przypadku pszczoł miodnych dźwięk podczas wentylacji skrzydeł wynosi 309 Hz, natomiast królowa wydaje dźwięk o częstotliwości 450 Hz. U os zidentyfikowano różnice w częstotliwościach odpowiadających wentylacji, tańca budzącego, sygnałom głodu wydawanym przez larwy, dźwiękowi lotu podczas ataku czy tańca robotnic przeciwko królowej. Te częstotliwości odpowiadają zarówno komunikacji pojedynczego owada, jak i całej grupy, i mogą różnić się w zależności od wielu warunków (24).

Monitorowanie bioakustyczne pszczoł stanowi wyzwanie ze względu na trudność przeprowadzenia i analizy zebranych danych. Wewnątrz ula każdy owad pełni swoje zadania, a dodatkowo na nagraniach pojawiają się artefakty dźwiękowe z otoczenia, takie jak odgłosy samochodów, ptaków, innych zwierząt czy ludzi. Profesjonalne i ukierunkowane badania nad dźwiękami pszczoł zaczęły być popularne dopiero w latach 50. XX w. ze względu na dostęp do technologii nagrywania i edycji dźwięku. Pierwszym zaobserwowanym zjawiskiem był wzrost aktywności akustycznej podczas rojenia. To właśnie wtedy Woods opatentował urządzenie do jego wykrywania, znane jako „Apidictor” (4). Wraz z postępem technologii dzisiaj możliwe jest szybkie nagrywanie dźwięków za pomocą aplikacji mobilnych, co ułatwia potwierdzanie obecności królowej w ulu. Sygnały generowane przez nową królową oraz tę, która pozostaje jeszcze w mateczniku, odgrywają kluczową rolę w losach roju. Odpowiadają im również dźwięki wydawane przez robotnice, które wskazują na brak królowej, powrót z początkowych lotów w celu sprawdzenia okolicy czy atak na rodzinę (35). Przed rojeniem stwierdzono, że kolonia wydaje dźwięki w zakresie około 150 Hz, natomiast w trakcie roju częstotliwość ta wzrasta do 500 Hz. Obserwowana zmiana częstotliwości i głośności korelowała ze spadkiem temperatury i wilgotności, co sugeruje zwiększoną wentylację przez pszczoły w tym okresie. Analiza akustyczna z co najmniej kilkudniowym wyprzedzeniem może umożliwiać przewidywanie zmian w impulsie predysponującym rodzinę do rojenia (71).

Dźwięki emitowane przez owady pełnią też funkcje odstraszające drapieżniki. Pewne podobieństwa w tym zakresie można zaobserwować między błonkoskrzydłymi a muchówkami. Trzmiele wykazują wyraźną różnicę między dźwiękami generowanymi podczas lotu a alarmowymi sygnałami dźwiękowymi. U ptaków wyuczona awersja do konkretnych bodźców dźwiękowych emitowanych przez owady jest bardziej powszechna niż wrodzona. Łączą one percepcję dźwiękową z innymi silnymi bodźcami sensorycznym, na przykład z przykrym smakiem. W rezultacie inne owady mogą naśladować te, które wykazują wrogi stosunek do danego drapieżnika (44). Pszczoły podczas obrony gniazda przed atakiem szerszeni mogą istotnie przekraczać typowo opisane limity częstotliwości. W trakcie takiego ataku stwierdzono, że pszczoły potrafią generować sykające dźwięki o podstawowej częstotliwości 5 kHz, z dodatkowymi skokami harmonicznymi w granicach od 15 do 16 kHz (71).

W dziedzinie monitorowania bioakustycznego najważniejszym aspektem jest precyzyjna klasyfikacja dźwięków generowanych przez pszczoły oraz ich skuteczna separacja od innych dźwięków, co osiąga się za pomocą wyspecjalizowanych czujników. Współczesne technologie oparte na uczeniu maszynowym, analizie matematycznej, programowaniu i obszernych bazach

danych znacznie to ułatwiają (79). Czujniki wibroakustyczne dostarczają nowych informacji na temat sygnałów mechaniczno-akustycznych generowanych przez samice zwiadowcze. Te sygnały są zapisem wibracji związanych z ruchem mięśni skrzydłowych; chociaż same skrzydła pozostają w bezruchu, gdy pszczoły przylegają do siebie. Zarówno sygnały akustyczne, jak i mechaniczno-akustyczne, w postaci wibracji, odgrywają istotną rolę w komunikacji, a w tej dziedzinie dokonano już kilku kontrowersyjnych odkryć. Różnice w komunikacji manifestują się głównie w czasie trwania wibracji, częstotliwości podstawowej oraz modulacji, czyli obecności lub braku pewnych składowych. Oznacza to, że w komunikacji z ich udziałem występuje sygnał, który może stymulować lub hamować reakcję innych pszczół w roju (61). Zaawansowane metody analizy widm wibracyjnych umożliwiają prognozowanie rojenia z około 90% skutecznością nawet 30 dni przed jego wystąpieniem. Takie dane są przydane w praktyce pasiecznej, redukując niepokoje pszczół przez pszczelarza, poprzez manipulowanie nimi oraz otwieranie pokrywy ula i oglądanie plastrów. Do tego celu wykorzystuje się mikrofony piezoelektryczne (58).

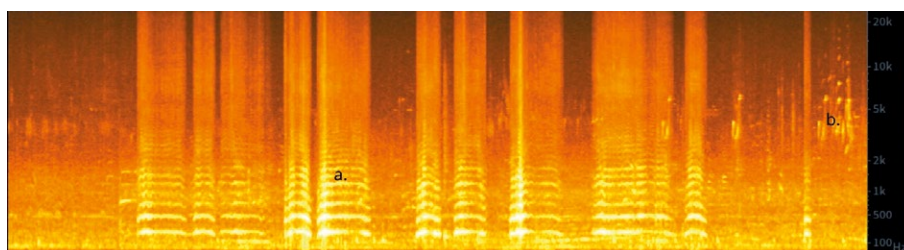
Własne obserwacje bioakustyczne

Badania nad bioakustycznym ulem były prowadzone od 2018 r. w rodzinnej pasiece i z wykorzystaniem nagrań terenowych (ryc. 2-4). Zebrane spektrogramy zawierały składowe harmoniczne sygnałów pszczół, obejmując zakres od 100 Hz do 2 kHz. Dzięki nim udało się ukazać szczegółowe zjawiska w komunikacji pszczół – zarówno międzyosobnicze, jak i międzygatunkowe. Długotrwałe obserwacje pokazały, że pszczoły potrafią zmieniać dźwięk w zależności od pory roku i warunków środowiska, a już poprzez samo słuchanie pszczelarz może być zdolny do odczytywania komunikatów świadczących o stanie zdrowia rodziny, w tym do przewidywania siły rodziny po zimowaniu.

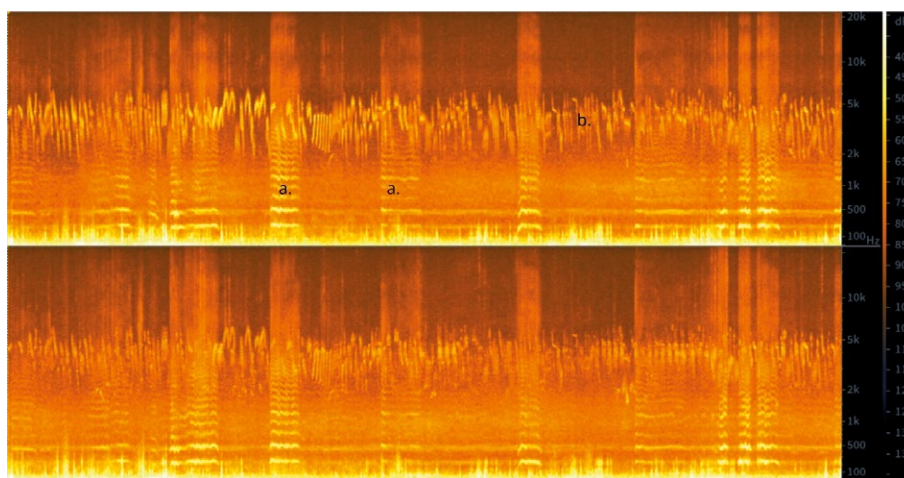
Pszczoły zderzają się w ulu, wydzielają brzęczący dźwięk w stylu „ups!”, co jest przykładem społecznego zastosowania komunikatu języka. Taką obserwację można uzyskać przy użyciu bardziej czułego mikrofonu, znajdując jej potwierdzenie w obserwacjach pojedynczych osobników na plastrze.

Największym wyzwaniem dla skonstruowania bioakustycznego ula, który przetwarza informacje z wne-

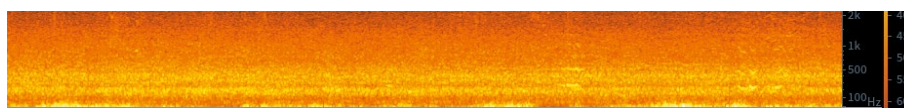
trza ula na te użyteczne dla człowieka, jest narastająca w czasie ogromna ilość informacji oraz ich przechowywanie i opracowywanie. Już tanie i dostępne na rynku mikrofony mogą być przydatne dla pszczelarzy, a ich użycie nie wymaga rozbudowanych systemów. To jest uzasadnione, ponieważ polski rynek pszczelarski cechuje rosnący wiek pszczelarzy, a ludzie ci nie chcą obsługiwać skomplikowanych urządzeń (62). Jest to sytuacja, która nie sprzyja rozwojowi wyspecjalizowanych aplikacji pasiecznych. Wiele danych dźwiękowych, takich jak m.in. utrata matki pszczół czy nagła zmiana warunków oświetlenia wywołuje niepokój wśród pszczół robotnic, co przejawia się zwiększonym ruchem na plastrach miodu i pojawieniem się niższych częstotliwości na nagraniach w przestrzeni 10-15 minut. W badaniach własnych zdecydowano się na zmianę założeń projektu poprzez zastosowanie wygłuszenia w ulach oraz zamontowanie mikrofonów w systemie przestrzennym. Zastosowanie mikrofonów stereo zmieniło zupełnie percepcję oceny zjawisk akustycznych w ulu. Niskie częstotliwości w ulu wydają się pełnić rolę celowych komunikatów międzyosobniczych, a bliższe amplitudzie dźwięki wspomagają spójność przestrzenną rodziny pszczelej. Dźwięki były rejestrowane ciągle zarówno w dzień, jak i w nocy, jednak w nocy rejestrowano znacznie



Ryc. 2. Spektrogram przedstawiający pszczoły zbierające pyłek na uprawach rzepaku w Górach Sowich (2019). A – zapis częstotliwości pszczół, b – szczygiel (*Carduelis carduelis*)



Ryc. 3. Nagranie pszczół oblatujących łąkę w okresie lata (2020). A – pszczoła, b – skowronek zwyczajny (*Alauda arvensis*)



Ryc. 4. Rój pszczół na drzewie (2020)

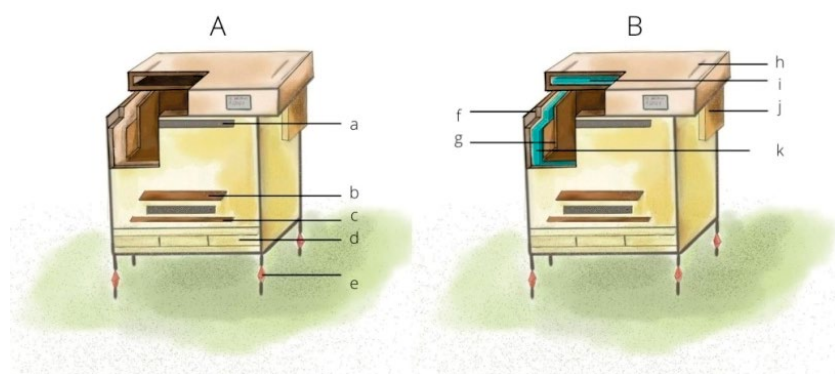
więcej nietypowych dźwięków przypominających komunikację „ups” oraz krótsze brzęczenie. Wiele z tych bardziej szczegółowych dźwięków zdaje się ginąć w całości pszczelej rodziny w ciągu dnia świetlnego, a ich rejestracja wymagałaby dostosowania odpowiednich narzędzi.

W monitorowaniu zimowli wystarczający okazał się mikrofon kontaktowy zamocowany do ścian ula. Spokojna aktywność rodziny manifestuje się jedynie bardzo delikatnym buczeniem o niskiej częstotliwości. Ten dźwięk może być efektem „klastrowania” pszczół, gdzie owady te przylegają do siebie, otaczając matkę pszczelą w kłębie.

Znaczne różnice w jakości uzyskanego dźwięku uzyskano dzięki zastosowaniu tłumienia akustycznego w ulu. Projekt bioakustycznego ula został stworzony na podstawie 10-plastrowego ula typu wielkopolskiego, co pozwoliło na zmianę ustawień z systemu o cieplej zabudowie na zimną (różnicując efekt nagranych dźwięków). W projekcie użyto 3 ula tego samego typu, ale jeden z nich był wykonany z polistyrenu, a dwa pozostałe z drewna. Przestrzenie między drewnianymi ścianami ula wypełniono słomą. Prototypowy ul bioakustyczny dodatkowo wyposażono w piankę akustyczną umieszczoną na listwach i pokrytą wodoodporną powłoką ochronną (ryc. 5).

Inspirację dla wygłuszenia ula zaczerpnięto z architektury, która korzysta z wielu materiałów dźwiękochłonnych w celu redukcji nadmiernego hałasu i echa. Do takich zastosowań wykorzystuje się granulki z tkaniny kauczukowej, ekspandowaną glinę, celulozę itp. Materiały granularne stanowią interesujące rozwiązanie do zastosowania w projektowaniu uli, ponieważ mogą precyzyjnie wypełnić ściany ula, jednocześnie zachowując wentylację ścian ula i przewodzenie ciepła lub termoizolację.

Obliczenia dla fizycznych współczynników pochłaniania dźwięku w warunkach eksperymentalnych przeprowadzili Turkiewicz i Sikora (z Katedry Mechaniki i Wibroakustyki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie) wskazując, że można tu używać polistyrenu, ekspandowanej gliny lub piasku kwarcowego. W produkcji drewnianych uli generowane są nadmiarowe materiały, które mogą być równie przydatne, takie jak wióry i pył drzewny, posiadające włóknistą strukturę. Przeprowadzone testy akustyczne wskazują, że pełnią one rolę materiałów dźwiękochłonnych. Mogą one być z powodzeniem wykorzystywane w celu ochrony wibroakustycznej. Zmiany w absorpcji zanieczyszczeń akustycznych istotnie wpływają na czas pogłosu pomieszczenia i współczynnik transmisji mowy, co znalazło swoje zastosowanie w budynkach użyteczności publicznej. Redukcja hałasu dla takich naturalnych odpadów została zmierzona w zakresie od 10 do 40 kHz. Drewno lub korek nie zapewniają



Ryc. 5. A – tradycyjny ul z wypełnieniem słomianym; B – ul z dodatkowym komponentem akustycznym

Objaśnienia: a – otwór wentylacyjny, b – dach, c – wylotek, d – taca, e – ochronne nakładki na nogi ula, f – drewniana obudowa zewnętrzna, g – wewnętrzna drewniana obudowa, h – daszek ula, i, k – wypełnienie akustyczne, j – system elektroniczny

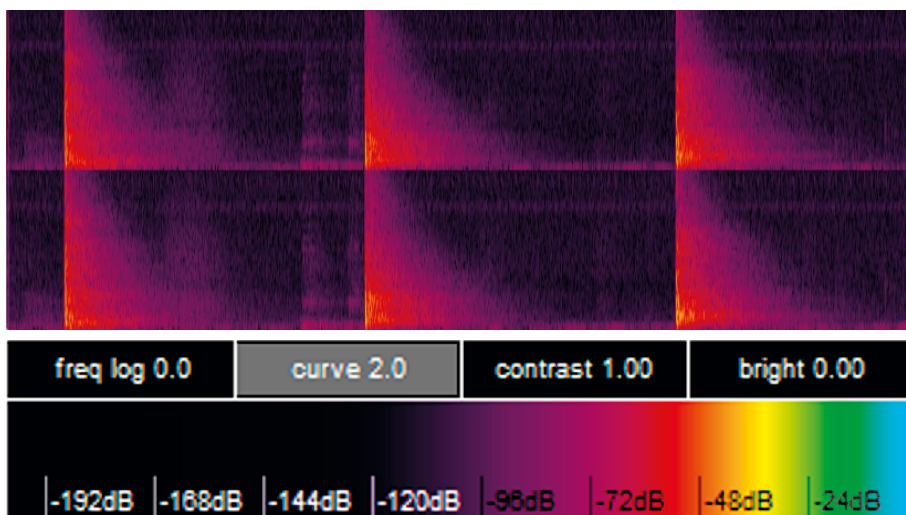
satisfakcjonującej ochrony akustycznej, ale wełna mineralna oraz specjalnie przygotowane panele akustyczne i pianka poliuretanowa znacząco zmieniają dobrostan akustyczny (74).

W zakresie absorpcji dźwięków dobrze poznano zasady przekształcania energii fal dźwiękowych na energię cieplną. Proces ten koncentruje się na wprowadzeniu bariery dla przewodzenia wibroakustycznego. Jednym z dobrze znanych materiałów, który temu sprzyja jest materiał typu „plastra miodu” wykonany z poliwęglanu, który imituje komórki plastra pszczelego. Różnice w średnicy, grubości i układzie rur, tworzących większe panele, wpływają na zmienność współczynnika absorpcji dźwięku. Zastosowanie kanałów pod niewielkim kątem oraz z większą porowatością skutkuje lepszym zmniejszeniem penetracji hałasu. Testy i charakterystyki tego materiału sugerują, że może on znaleźć inne zastosowanie także jako bariera akustyczna. Poza właściwościami dźwiękochłonnymi, może pełnić np. rolę elewacji przyjaznej do zamieszkania przez owady zapylające. Takie wyznaczone miejsca gniazdowania dzikich zapylaczy w środowisku miejskim, znane są jako „hotele dla pszczół” (73).

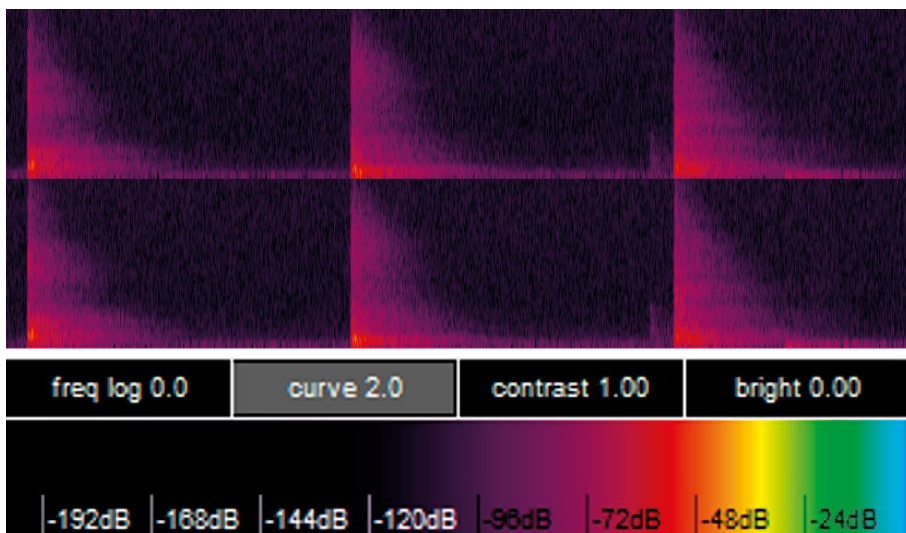
W realizacji projektu użyto następujących komponentów: profilowanej pianki poliuretanowej akustycznej, gładkiej pianki izolacyjnej dźwięku z ochronną folią, gładkiej pianki poliuretanowej akustycznej o otwartej strukturze komórkowej oraz podkładu wibroakustycznego. Zastosowanie zewnętrznej izolacji akustycznej w postaci pianki izolacyjnej z ochronną folią przyniosło efekt poprawy tłumienia hałasu wewnątrz ula (ryc. 6 i 7), zarówno przed, jak i po zasiedleniu pszczołami.

Podsumowanie

Badania nad społeczną komunikacją pszczół, zwłaszcza w kontekście bioakustyki, poszerzają perspektywę zrozumienia ich zachowań oraz wpływu różnych czynników na emitowane przez nie dźwięki.



Ryc. 6. Spektrogram – pomiar hałasu w drewnianym ulu; przedstawia krajobraz akustyczny tradycyjnego ula i przechodzący dźwięk spoza ula



Ryc. 7. Spektrogram – pomiar w ulu wyizolowanym pianką akustyczną

Biokomunikacja pszczół, obejmująca taniec, dźwięki, feromony, ruchy i drgania, pełni kluczową rolę w życiu rodziny pszczołej. Jednym z nowych punktów widzenia jest analiza wpływu temperatury, wilgotności i innych czynników środowiska na częstotliwość i energię spektralną dźwięków pszczół. Rejestracja tych zmian może stanowić istotny wskaźnik zdrowia rodziny pszczołej, szczególnie w kontekście przygotowań do zimowania czy procesu rojenia.

Warto zauważyć, że badania nad dźwiękami w ulu pozwalają wnikać nie tylko w aspekty komunikacji, ale także dostarczają informacji o ogólnym dobrostanie pszczół. Monitorowanie akustyczne może wskazywać na problemy, takie jak choroby czy niepokój, a także świadczyć o poziomie dobrostanu pszczół w danym środowisku. Analizując złożoność danych bioakustycznych, tego typu badania wymagają czasochłonnej obserwacji. Zjawiska biologiczne, takie jak migracje, rojenie czy zmiany w impulsach predysponujących rodzinę do tych działań, rozwijają się na przestrzeni czasu. W kontekście wielowymiarowych danych i zawłości zjawisk biologicznych, badania bioakustyczne

mogą być prowadzone nawet przez kilka lat, dotycząc jednego specyficznego zachowania lub problemu. Sygnały w rodzinie pszczołej pełnią rolę ważnych komunikatów nie ograniczają się jedynie do jednego źródła. To skomplikowana kombinacja sygnałów z różnych pięt komunikacji, takich jak taniec, feromony, ruch czy drgania, tworzy pełen obraz komunikacji wewnątrz rodziny, którą można opisywać też jako „superorganizm”. Zrozumienie tego skomplikowanego systemu wymaga interdyscyplinarnego podejścia, które obejmuje nie tylko biologię i fizykę, ale przydatne mogą się okazać wpływy innych dziedzin, w szczególności architektury czy materiałoznawstwa. Na uwagę zasługuje fakt możliwego wprowadzania do praktyki pszczelarskiej modyfikacji tradycyjnych uli, z wykorzystaniem materiałów dźwiękochłonnych, co może przyczynić się do poprawy komfortu akustycznego pszczół. Wydaje się, że koszt takiej inwestycji jest niewielki w porównaniu do ogólnego kosztu utrzymania pszczół, co sugeruje możliwość akceptacji takich modyfikacji przez producentów uli.

W kontekście ochrony gatunkowej pszczół i wyjaśnienia przyczyn ich wymierania, bioakustyczne badania stają się kluczowym narzędziem. Ponadto, zaangażowanie społeczno-

ści pszczelarskiej jest wartościowe, ponieważ pszczelarze, związani emocjonalnie z pszczołami, posiadają cenny zasób obserwacji i chęci nawiązania uniwersalnego dialogu ze swoimi owadami. Dlatego w tym obszarze współpraca między nauką a praktyką może przynieść korzyści zarówno dla zrozumienia pszczół, jak i dla działań na rzecz ich ochrony.

Badania nad bioakustycznym ulem prowadzone od 2018 r. w rodzinnej pasiece dostarczyły autorom cennych obserwacji dotyczących komunikacji pszczół. Z wykorzystaniem nagrań terenowych udało się uzyskać spektrogramy, obejmujące zakres od 100 Hz do 2 kHz, które ujawniły szczegółowe zjawiska w komunikacji międzyosobniczej i międzygatunkowej pszczół. Obserwacje te wykazały, że dźwięk pszczół może zmieniać się w zależności od pory roku i warunków środowiska. Warto zauważyć, że pszczoły potrafią wydawać charakterystyczny dźwięk „ups!” podczas zderzeń w ulu, co stanowi społeczne zastosowanie komunikatu języka. Autorzy korzystali z różnych metod, w tym z zastosowaniem mikrofonów stereo, wygłuszenia w ulach i materiałów dźwiękochłonnych. Zmiany

te pozwoliły na lepszą percepcję dźwięków w ulu, szczególnie tych niskich częstotliwości, które wydają się pełnić rolę ważnych komunikatów międzyosobniczych. Dodatkowo, badania nad migracjami pszczół, rojeniem oraz wpływem warunków oświetleniowych dostarczyły nowych spostrzeżeń, takich jak zwiększony ruch na plastrach miodu i pojawienie się niższych częstotliwości w nocy. Projekt bioakustycznego ula, wykorzystujący komponenty akustyczne, został oparty na tradycyjnej gospodarce pasiecznej. Wygłuszenie ula za pomocą materiałów dźwiękochłonnych, takich jak pianka poliuretanowa, miało na celu zredukowanie ilości informacji dźwiękowej oraz ułatwienie przetwarzania danych. Wnioski z eksperymentów autorów sugerują, że istnieje potencjał zastosowania wygłuszonego ula w pszczelarstwie. Dodatkowo, obserwacje nad zmianami w absorpcji dźwięków otoczenia wskazują na możliwość stworzenia bardziej przyjaznego środowiska akustycznego dla pszczół. Te unikalne obserwacje i eksperymenty wnoszą istotny wkład w rozwój badań nad bioakustyką pszczół, mając potencjał wpłynięcia na strategię utrzymania i ochrony tych istotnych dla ekosystemu owadów.

Podsumowując, badania bioakustyczne nad komunikacją pszczół są nie tylko fascynującym obszarem naukowym, lecz mają ogromne znaczenie dla ochrony tych istotnych dla ekosystemów owadów. W obliczu wyzwań związanych z wielowymiarowymi danymi i zawiłymi biologicznymi, kontynuowanie badań jest kluczowe dla pełnego zrozumienia roli dźwięku i drgań w życiu pszczół oraz ich przyszłości w dynamicznie zmieniającym się środowisku.

Piśmiennictwo

1. *Beekman M., Makinson J. C., Couvillon M. J., Preece K., Schaerf T. M.*: Honeybee linguistics – a compare analysis of the waggle Dance among species of *Apis*. *Front. Ecol. Evol.* 2015, 3 (11), 1-11.
2. *Błaszak C.*: Zoologia. Stawonogi. Tchawkodyszne. Tom 2, część 2, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012, 314.
3. *Bortolotti L., Costa C.*: Chemical communication in the honey bee society. *Neurobiology of chemical communication*. CRC Press/Taylor & Francis 2014.
4. *Bromenshenk J. J., Henderson C. B., Seccomb R. A., Welch P. M., Debnam S. E., Firth D. R.*: Bees as biosensors: chemosensory ability, honey bee monitoring systems, and emergent sensor technologies derived from the pollinator syndrome. *Biosensors* 2015, 5, 678-711.
5. *Brzostek D.*: Tworzenie (się) laboratorium. Humanistyka wobec materialności narzędzi i przedmiotów badań. *Laboratoria humanistyki* 2021, 2, 153-163.
6. *Butlerow A.*: Pszczoła, jej życie. Główne prawa rozumianego hodowania pszczół. Drukarnia rządu gubernialnego, Suwałki 1877, 13-30.
7. *Chalifman I.*: Pszczoły. Książka o biologii rodziny pszczołowej i zdobycach nauki o pszczołach. Wyd. II, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa 1954, 24-41.
8. *Chao K. W., Hu N. Z., Chao Y. C., Su C. K., Chiu W. H.*: Implementation of artificial intelligence for classification of frogs in bioacoustics. *Symmetry* 2019, 11 (12), 1454.
9. *Darwin K.*: Wyras uciec u człowieka i zwierząt. Londyn 1872.
10. *Deng K., Cui J.*: Application and prospect of network analysis in the studies of animal vocal communication and bioacoustics. *Biodiversity Science* 2023, 31 (1), 22318.
11. *Dreller C., Kirchner W. H.*: Hearing in honeybees: localization of the auditory sense organ. *Journal of Comparative Physiology* 1993, 173, 275-279.
12. *Erbe C.*: Animal bioacoustics. *Sound Perspectives*. Acoustical Society of America 2017, 13 (2), 65-67.
13. *Fabirkiewicz A.*: Środowisko akustyczne zwierząt. Metody techniczne badań i próby ich praktycznego zastosowania. Fundacja – Rozwój SGGW, Warszawa 1999.
14. *Farina A.*: Bioacoustics theories, [w:] *Soundscape Ecology*. Springer 2014, 43-61.
15. *Fletcher N. H.*: Animal bioacoustics. *Springer Handbook of Acoustics* 2007, 785.
16. *Girdwoyń M.*: Anatomia pszczoły. Pamiętnik Towarzystwa Nauk Ścisłych w Paryżu. T. VI, Królewskie Towarzystwo Rolnicze Krakowskie 1874, 1-44.
17. *Gliński J.*: Beekeepers' becomings and the agency of a bee. *Etnografia Polska* 2022, 66 (1-2), 143-158.
18. *Grodzicki P., Caputa M.*: Biologia termiczna pszczół – zdumiewająca przemiana od zmienności do stałości. *Kosmos. Problemy nauk biologicznych* 2003, T 52, 2-3 (259-260), 271-282.
19. *Grüter C., Czaczkes T. J.*: Communication in social insects and how it is shaped by individual experience. *Animal Behaviour* 2019, 151, 207-215.
20. *Guderska J.*: *Pszczelarstwo*, Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa 1951, 25-30.
21. *Harnett S.*: Blind beekeeper relies on sound to keep her hives happy. *KQED* (online: kqed.org) 2019.
22. *Hefner R. S.*: Comparative study of sound localization and its anatomical correlates in mammals. *Acta Otolaryngologica. Supplementum* 1997, 532, 46-53.
23. *Hobaiter C., Byrne R. W.*: The meanings of chimpanzee gestures. *Current Biology* 2014, 24, 1596-1600.
24. *Ishay J.*: The sounds of honey bees and social wasps are always composed of a uniform frequency. *J. Acous. Soc. Am.* 1982, 72, 671.
25. *Janiszewska K.*: Mowa pszczół. *Pasieka* 2013, 3.
26. *Kauf P.*: Wpływ dźwięków na rozwój i zachowanie ssaków z uwzględnieniem człowieka. Praca licencjacka na Wydziale Biologii. Repozytorium Uniwersytetu Jagiellońskiego 2019.
27. *Klein B. A.*: Sleeping in a society: social aspects of sleep within colonies of honey bees (*Apis mellifera*). The University of Texas at Austin. Dissertation 2010, 1-98.
28. *Klein B. A., Stiegler M., Klein A., Tautz J.*: Mapping sleeping bees within their nest: spatial and temporal analysis of worker honey bee sleep. *PLOS ONE* 2014, 9 (7), e102316.
29. *Klink R., August T., Bas Y., Bodesheim P., Bonn A., Fossøy F., Høye T. T., Jongejans E., Menz M. H. M., Miraldo A., Roslin T., Roy H. E., Ruczyński I., Schigel D., Schäffler L., Sheard J. K., Svenningsen C., Tschan G. F., Wäldchen J., Zizka V. M. A., Aström J., Bowler D. E.*: Emerging technologies revolutionise insect ecology and monitoring. *Trends in Ecology & Evolution* 2022, 37 (10), 872-885.
30. *Klocek C., Penar W.*: Relacje człowiek zwierzę i ich konsekwencje. *Przegl. Hod.* 2017, 6, 3-5.
31. *Koeniger N., Koeniger G., Gries M., Tingek S.*: Drone competition at drone congregation areas in four *Apis* species. *Apidologie* 2005, 36, 211-221.
32. *Köhler J., Jansen M., Rodriguez A., Kok P. R., Toledo L. F., Emmrich M., Glaw F., Haddad C. F. B., Rödel M. O., Vences M.*: The use of bioacoustics in anuran taxonomy: theory, terminology, methods and recommendations for best practice. *ZOOTAXA* 2017, 4251 (1), 4-122.
33. *L'Anson Price R., Grüter C.*: Why, when and where did honey bee dance communication evolve? *Frontiers in Ecology and Evolution* 2015, 3, 124, 1-7.
34. *Lewandowski R.*: Homo musicus. Muzyka w relacjach społecznych, [w:] *Lewandowski R., Kaleńska-Rodzaj J.* (red.): *Psychologia muzyki. Współczesne konteksty zastosowań*. Harmonia Universalis, Gdańsk 2014, 15-36.
35. *Liao Y., McGuirk A., Biggs B., Chaudhuri A., Langlois A., Deters V.*: Non-invasive beehive monitoring through acoustic data using SAS Event Stream Processing and SAS Viya 2020. <https://www.sas.com/content/dam/SAS/support/en/sas-global-forum-proceedings/2020/4509-2020>
36. *Lindauer M.*: *Communication among social bees*. Harvard University Press 1971.
37. *Macêdo Mello R. de, Gregorin R.*: Tradition vs. innovation: comparing bioacoustics and mist-net results to bat sampling. *The International Journal of Animal Sound and its Recording* 2022, 31, 5, 575-593.
38. *Mariette J., Carcaud J., Sandoz J. C.*: The neuroethology of olfactory sex communication in the honeybee *Apis mellifera* L. *Cell and Tissue Research* 2021, 383, 177-194.
39. *Mańkowska H., Stotko H., Bartyzel L. B., Wýsocki J., Charuta A.*: Anatomia porównawcza narządu słuchu i równowagi u kręgowców. *Acta Sci. Pol., Medicina Veterinaria* 2005, 4 (1), 87-93.
40. *Marler P.*: The logical analysis of animal communication. *Journal of Theoretical Biology* 1961, 1 (3), 295-317.
41. *Maurus M., Barclay D., Streit K. M.*: Acoustic patterns common to human communication and communication between monkeys. *Language & Communication* 1988, 8 (2), 87094.
42. *McLoughlin M. P., Stewart R., McElligott A. G.*: Automated bioacoustics: methods in ecology and conservation and their potential for animal welfare monitoring. *Journal of the Royal Society Interface* 2019, 16 (155), 1-12.

43. Mok H. K.: Recent progress in bioacoustic research in Taiwan. *Kuroshio Science* 2014, 8-1, 15-16.
44. Moore C., Hassall Ch.: A bee or not a bee: an experimental test of acoustic mimicry by hoverflies. *Beh. Ecol.* 2016, 27, 1767-1774.
45. Morcintec N.: Znak językowy wśród innych rodzajów znaku. *Rozprawy Komisji Językowej Wrocławskiego Towarzystwa Naukowego XXXI*, Wrocław 2005, 7-15.
46. Moller H., Pedersen C. S.: Hearing at low and infrasonic frequencies. *Noise & Health* 2004, 6 (23), 37-57.
47. Niedźwiedzka K.: Sposoby porozumiewania się pszczoły miodnej. *Zeszyty Studenckiego Ruchu Naukowego Akademii Świętokrzyskiej w Kielcach* 2006, 12, 124-125.
48. Nowak T.: Komunikacja komplikacji i komplikacja komunikacji. Porozumiewanie się zwierząt ludzkich i nie-ludzkich na tle założeń biosemiotyki. *Zoophologica. Polish Journal of Animal Studies* 2022, 1 (9), 1-34.
49. Ochocki M.: *Fale akustyczne*. Ruda Śląska 2003, 1-12.
50. Odom K. J., Araya-Salas M., Morano J. L., Ligon R. A., Leighton G. M., Taff C. C., Dalziel A. H., Billings A. C., Germain R. R., Pardo M., Guimarães de Andrade L., Hedwig D., Keen S. C., Shiu Y., Charif R. A., Webster M. S., Rice A. N.: Comparative bioacoustics: a roadmap for quantifying and comparing animal sounds across diverse taxa. *Biological Reviews* 2021, 96 (4), 1135-1159.
51. Oliveira R. C., Oi C. A., Meirelles M., Nascimento M. M., Vollet-Neto A., Alves D. A., Campos M. C., Nascimento F., Wenseleers T.: The origin and evolution of queen and fertility signals in Corbiculate bees, *BMC Evolutionary Biology* 2015, 15, 254.
52. Online: pszczoły.siadalski.pl
53. Osiejuk T.: „Metody nagrywania i analizy dźwięków w badaniach bioakustycznych”. *Nietoperze* 2000, 01 (1), 71-92.
54. Oza A., Sapijka K.: Wykorzystanie współczynników akustycznych do analizy krajobrazu dźwiękowego. [w:] *AW Journal Multidisciplinary Academic Magazine* 2022, 3 (1), 37-43.
55. Pavan G.: Short field course on bioacoustics. *European Distributed Institute of Taxonomy, EDIT. Taxonomy Summer School* 2008, 1-15.
56. Pawlus M., Siwiec M.: *Matematyka, Fizyka, Chemia, Kompendium licealisty*. Wydawnictwo Szkolne PWN, Warszawa – Bielsko Biala 2014.
57. Price R., Grüter C.: Why, when and where did honey bee Dance Communications evolve? *Front. Ecol. Evol.* 2015, 3 (11), 1-7.
58. Ramsey M. T., Bencsik M., Newton M. I., Reyes M., Pioz M., Crauser D., Delso N. S., Le Conte Y.: The prediction of Warming in honeybee colonies Rusing vibrational spectra. *Nature* 2020, *Scientific Reports* 10, 9798.
59. Roman A.: *Podstawy pszczelarstwa*. Wydawnictwo Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Wrocław 2006, 58.
60. Sainsburg T., Genter T. Q.: Toward a computational neuroethology of vocal communication: From bioacoustics to neurophysiology. *Emerging Tools and Future Directions. Frontiers in Behavioural Neuroscience* 2021, 15, 811737, 1-24.
61. Schlegel T., Visscher P. K., Seeley T. D.: Beeping and piping: characterization of two mechano-acoustic signals used by honey bees in swarming. *Naturwissenschaften* 2012, 99, 1067-1071.
62. Semkiw P.: *Sektor pszczelarski w Polsce w 2020 r.* Puławy 2020, inhort.pl.
63. Seyfarth R. M., Cheney D. L.: Signalers and Receivers in Animal Communication. *Annual Review of Psychology* 2003, 54, 145-173.
64. Shawkat A. S.: Evaluation of human voice biometrics and frog bioacoustics identification systems based on feature extraction method and classifiers. *Conference: 1st International Conference on Context-Aware Systems and Applications (ICCASA 2012)* 2012, 109, 41-50.
65. Stachurska A., Śniadek J., Janczarek I.: Pierwsza reakcja częstości skurczów serca koni na różne rodzaje muzyki w stajni. *Med. Weter.* 2017, 73 (8), 500-504.
66. Stasiowska J.: Komunikacja na liniach biofeedbacku – związku sound artu z eksperymentami bonifikującymi rośliny. *Prace Kulturoznawcze* 2020, 24 (3), 111-129.
67. Steiner R.: *Tajemnice pszczół*. Wydawnictwo Genesis, Gdynia 2015.
68. Szentgyörgyi H., Czeakońska K., Tofilski A.: Honey bees are larger and live longer after developing at low temperature. *Journal of Thermal Biology* 2018, 78, 219-226.
69. Taraszka-Drożdż B.: Rozszerzenia semantyczne nazw dźwięków wydanych przez istotę żywą w opisie muzycznych wrażeń słuchowych. *Acta Neophilologica* 2017, XIX (1), 43-53.
70. Teixeira D., Maron M., von Rensburg B. J.: Bioacoustic monitoring of animal vocal behavior for conservation. *Conservation Science and Practice* 2019, 1 (8), e72.
71. Terenzi A., Cecchi S., Spinsante S.: On the importance of the sound emitted by honey bee hives, *Vet. Sci.* 2020, 7, 168.
72. Tomańska A.: *Pszczelarstwo i jedwabnictwo sowiogórskie*. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Kultury Regionalnej i Badań Literackich im. Franciszka Karpińskiego, Siedlce 2023.
73. Turkiewicz J.: Własności dźwiękochłonne struktur warstwowych z materiałem typu „plaster miodu”. *Techniczne Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej* 2007, z. 1-M.
74. Turkiewicz J., Sikora J.: Doświadczalne wyznaczanie współczynnika pochłaniania dźwięku materiałów włóknistych i włónowych będących odpadami produkcyjnymi. *Czasopismo Techniczne* 2009, 12, 106, 109-120.
75. Vallee M.: The science of listening in bioacoustics research: sensing the animals' sounds. *Theory, Culture & Society* 2017, 35 (2), 47-65.
76. Whitlow W. L. Au., Hastings M. C.: *Principles of Marine Bioacoustics* 2008.
77. Wood J. D., McCowan B., Langbauer Jr W. R., Viljoen J. J., Hart L. A.: Classification of African elephant *Loxodonta Africana* rumbles using acoustic parameters and cluster analysis. *The International Journal of Animal Sound and its Recording* 2005, 15 (2), 143-161.
78. Yi-Kweon J.: Insect communication: concepts, channels and contexts. *Korean Journal of Applied Entomology* 2011, 50 (4), 383-393.
79. Zgank A.: Bee swarm activity acoustic classification for an IoT-Based Farm Service. *Sensors* 2020, 20, 21.
80. Zgonik V., Čokl A.: The role of signals of different modalities in initiating vibratory communication in *Nezara viridula*. *Central European Journal of Biology* 2014, 9 (2), 200-211.
81. Żurowski S.: Wokół problemu definiowania pojęcia dźwięk. *Linguistica Copernicana* 2009, 1 (1), 144-155.

Autor korespondencyjny: lek. wet. Anna Tomańska, Katedra Biostruktury i Fizjologii Zwierząt, Wydział Medycyny Weterynaryjnej, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, ul. Koźuchowska 1/3, 51-630 Wrocław; e-mail: 95635@student.upwr.edu.pl