

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЗАПИСЫВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ НА ПРИМЕРЕ *HETEROCERUS FENESTRATUS* (THUNBERG, 1784) (COLEOPTERA: HETEROCERIDAE)

© 2023

Родионова Е.Ю.

Кубанский государственный университет (г. Краснодар, Российская Федерация)

Аннотация. В русскоязычной литературе достаточно широко известны работы по вибрационной коммуникации для Orthoptera и Hemiptera. В основном для записи данной коммуникации используют пьезоэлектрический адаптер ГЗК-661 или электромагнитный преобразователь ГЗМ-105. Использование данных устройств не дают удовлетворительных результатов при записи насекомых меньше 1 см. В данной статье рассматривается сравнительная характеристика записывающих устройств на основе пьезоэлектрического преобразователя ГЗК-661, электромагнитного преобразователя ГЗМ-105 и электродинамической головки eas15s02m при записи вибрационной коммуникации околотовидного жесткокрылого *Heterocerus fenestratus* (Thunberg, 1784) (Coleoptera: Heteroceridae). Сравнительный анализ эффективности трех рассмотренных в данной статье преобразователей показывает, что наилучшими характеристиками обладает преобразователь на основе электродинамической головки громкоговорителя, используемого в качестве источника сигнала (обратный режим работы). Помимо этого, экранированная магнитная система динамической головки обеспечивает высокую магнитную индукцию в рабочем зазоре и нечувствительность к наводкам от внешних электромагнитных полей. Было проанализировано 176 значений стрессовых сигналов для самца и 189 для самок. Диапазон доминантных частот имел разброс от 857,29 до 1002,01 Гц для самцов и от 898,04 до 1189,12 Гц для самок.

Ключевые слова: вибрационная коммуникация; датчики; Heteroceridae; сигналы стресса; жесткокрылые; пьезоэлектрический преобразователь; электромагнитный преобразователь; электродинамическая головка; стридуляционный файл; плектр; стридуляция.

A COMPARATIVE CHARACTERIZATION OF RECORDING DEVICES FOR VIBRATION SIGNALS ON THE EXAMPLE OF *HETEROCERUS FENESTRATUS* (THUNBERG, 1784) (COLEOPTERA: HETEROCERIDAE)

© 2023

Rodionova E.Yu.

Kuban State University (Krasnodar, Russian Federation)

Abstract. Works on vibration communication for Orthoptera and Hemiptera are widely known in Russian literature. Basically, the piezoelectric adapter GZK-661 or the electromagnetic transducer GZM-105 are used for recording this communication. The use of these devices does not give satisfactory results when recording insects smaller than 1 cm. In this paper we consider a comparative characteristic of recording devices based on the piezoelectric transducer GZK-661, electromagnetic transducer GZM-105 and electrodynamic head eas15s02m when recording vibration communication of near-water rigid-winged *Heterocerus fenestratus* (Thunberg, 1784) (Coleoptera: Heteroceridae). A comparative analysis of the efficiency of the three transducers considered in this paper shows that the transducer based on the electrodynamic loudspeaker head used as a signal source (reverse mode of operation) has the best characteristics. In addition, the shielded magnetic system of the dynamic head provides high magnetic induction in the working gap and insensitivity to inductions from external electromagnetic fields. 176 stress signals were recorded for males and 189 for females. The range of dominant frequencies ranged from 857,29 to 1002,01 Hz for males and from 898,04 to 1189,12 Hz for females.

Keywords: vibration communication; detectors; Heteroceridae; stress signals; beetles; piezoelectric transducer; electromagnetic converter; electrodynamic speaker driver; stridulatory file; plectrum; stridulation.

Введение

Биоакустика – область в биологии и раздел в зоологии, который занимается изучением звуковой сигнализации у животных и их звуковых взаимоотношений. Область биоакустики – изучение роли звука как средства передачи информации в мире живых существ, изучение всевозможных способов звуковой связи между живыми существами, механизмы образования и восприятия у них звуков, а также принципы кодирования и декодирования передаваемой информации в живых биоакустических системах [1, с. 20–23]. В воздухе или в воде звуковые волны рас-

пространяются в трех измерениях, но некоторое локальное уменьшение и усиление амплитуды может быть вызвано барьерами, также различиями в импедансе воздуха или формой самого животного или положением сигнализационного звука [2, р. 179–185; 3, р. 33–44; 4, р. 2597–2608]. Вибрационные сигналы во влажных песках могут значительно ослабевать [5, р. 345–353]. Звуковые волны могут служить примером колебательного процесса. Всякое колебание связано с нарушением равновесного состояния системы и выражается в отклонении ее характеристик от равновесных значений с последующим возвращением к

исходному значению. Для звуковых колебаний такой характеристикой является давление в точке среды, а ее отклонение – звуковым давлением.

Одним из методов изучения биоакустических сигналов является их запись с последующим анализом. Другим методом является изучение поведения живых существ при воспроизведении записанных биоакустических сигналов. Для жесткокрылых описывают несколько механизмов генерации звуков: стридуляция, тремулация, колебания крыльев и удары об субстрат [6, с. 12–28; 7, р. 397–403]. В последние десятилетия изучение акустической коммуникации насекомых в контексте поведения жесткокрылых активно развивается. Первые работы по акустике описывали использование конденсаторных микрофонов для записи звуков жесткокрылых [8, р. 407–413; 9, р. 486–496; 10, р. 263–270; 11, р. 225–240; 12]. В некоторых случаях использовали систему активного шумоподавления, когда с помощью одного микрофона записывается непосредственно сам сигнал, а на второй – окружающий шум. В результате шум вычитали из дорожки записи с полезным сигналом и получали только смысловой сигнал [13; 14, с. 428–433]. Вибрационную коммуникацию записывали также с помощью лазерных датчиков, и было выявлено, что при восприятии данных сигналов используются тимпанальные, Джонсоновы органы или вибрационные рецепторы [15, с. 38–42; 16, р. 11371–11375; 17, р. 315–337; 18, р. 415–435]. В России активно используют акустико-электрические преобразователи для записи биоакустических сигналов насекомых пьезоэлектрической головки звукоснимателя типа ГЗК-661 или ГЗП-311 от электропроигрывателя граммофонных виниловых пластинок. Паспортная чувствительность пьезоэлектрической головки ГЗК-661 на частоте 1 кГц составляет 50 мВ/см/с [19, с. 320–335; 20, с. 1021–1025; 21, с. 97–106; 22, с. 131–140; 23, с. 23–25]. В соответствии с рекомендациями производителя подключение головки осуществляется непосредственно к линейному входу записывающего устройства без использования дополнительного усилителя-корректора. Но для объекта нашего исследования *Heteroceris fenestratus* (Thunberg, 1784) данный способ записи не подходит. Причины данной особенности будут обговорены далее.

Для записывающих устройств в акустике, как правило, есть несколько требований. Во-первых, звукозаписывающая аппаратура, применяемая в биоакустике, должна обеспечивать высокое соотношение сигнал/помеха и обладать значительно более широким диапазоном частот, чем стандартный телефонный канал [24, с. 168–177]. Во-вторых, компоненты, составляющие звукозаписывающую аппаратуру, должны быть свободны от частотных, фазовых и временных искажений, для чего должны представлять собой минимально-фазовые цепи [25, с. 43–56]. В-третьих, звукозаписывающая аппаратура должна иметь минимальный коэффициент нелинейных искажений, чтобы не дополнять записанный сигнал частотными компонентами, которых не было в исходном звуке [26, с. 13–36]. В-четвертых, при записи биоакустических сигналов не должны применяться методы сжатия информации с потерями, такие как MPEG-1 Audio Layer 3 (MP3) или Advanced Audio Coding (AAC).

Объектом нашего исследования являются стрессовые звуковые сигналы жесткокрылых *H. fenestratus*, относящиеся к семействам Heteroceridae. Пилоусы (Coleoptera: Heteroceridae) живут в мелкодисперсных глинистых и песчаных типах почвы, где достаточно сильное увлажнение. Как правило, образуют колонии с выраженной биотопической симпатрией [27, р. 49–56]. Они используют акустический канал связи для общения друг с другом. Существует два возможных способа коммуникации. Первый – это акустический канал, основанный на стридуляции, а второй – субстратная вибрационная коммуникация. Вибрационная коммуникация связана с условиями обитания [28, р. 17–47]. Виды пилоусов издают звук, скребя задним бедром (плектром или plectrum) по первому брюшному сегменту (стридуляционным файлом или pars stridens) [29, р. 538–551; 30, р. 37; 31, р. 433–452]. Такой же тип стридуляционных органов характерен и для семейства Cetoniidae [7, р. 399–401]. Целью нашего исследования было испытание двух вибрационных датчиков в сравнении с конденсаторным микрофоном для данного вида.

Материалы и методы

Сбор материала

Экземпляры *H. fenestratus* были собраны на берегу р. Кубань на территории ПКЮ 30-летия Победы г. Краснодара общепринятыми энтомологическими методами: взмучивание, просеивание субстрата через энтомологическое сито [32, с. 118–140]. Жуки помещались в контейнер с предварительно насыпанным субстратом и переносились в постоянный аквариум. В качестве контейнера для разведения насекомых использовали аквариум-переноску с насыпанным увлажненным песком. Жуков содержали при температуре +24...+28°C, относительной влажности 60–65%. Субстрат постоянно умеренно увлажняли.

Регистрация и анализ сигналов

Сравнению эффективности подвергались два изготовленных в лабораторных условиях акустико-электрических преобразователя, один с использованием пьезоэлектрической головки типа ГЗК-661, второй на основе электромагнитной головки типа ГЗМ-105. Кроме того, в качестве преобразователя испытывалась динамическая головка eas15s02m без каких-либо доработок и изменений конструкции (рис. 1).

В качестве точечного источника звука использовался миниатюрный капсюль от головного телефона с внутренним сопротивлением 16 Ом, в центре мембраны которого была сформирована из стоматологического композита миниатюрная игла длиной 1,5 мм. Капсюль, закрепленный на штативе, с небольшим прогибом прижимался иглой в бумажную мембрану испытываемого преобразователя в точке, отстоящей от иглы звукоснимателя на 30 мм. Игла звукоснимателя и игла точечного источника звука располагались на линии, проходящей под углом 90 градусов к оси иглодержателя.

Для испытания динамической головки eas15s02m игла точечного источника звука прижималась непосредственно к диффузору на расстоянии 30 мм от центра пылезащитного колпачка. Предварительный усилитель УП выполнен на малощумящем операционном усилителе типа К548УН1А (зарубежный аналог LM 381) по типовой схеме не инвертирующего

усилителя [33], приведенной на рисунке 1, с использованием одного дифференциального входа. Использование только одного дифференциального входа позволило снизить уровень собственных шумов усилителя в 1,4 раза.

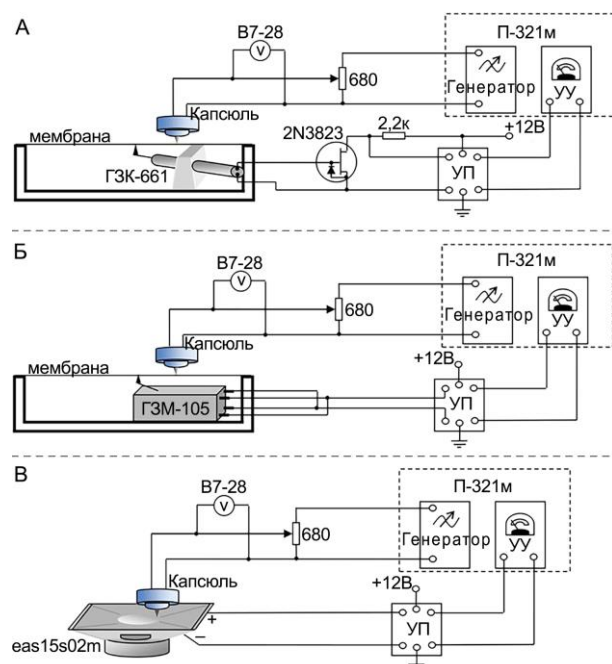


Рисунок 1 – Схема лабораторного стенда для испытания преобразователя на основе:
А – пьезоэлектрического звукоснимателя;
Б – электромагнитного звукоснимателя;
В – электродинамической головки eas15s02m

Во время испытания преобразователей на телефонный капсюль подавался синусоидальный электрический сигнал частотой от 300 Гц до 20 кГц и постоянной мощностью 1 мкВт от генератора прибора П-321М, что соответствует напряжению на катушке капсюля 4 мВ. Напряжение на катушке капсюля регулировалось органами управления генератора и дополнительно плавно регулировалось потенциометром на 680 Ом. Контроль напряжения на катушке капсюля осуществлялся по электронному вольтметру типа В7–28.

Уровень сигнала на выходе предварительного усилителя УП измерялся на нагрузке 600 Ом измерителем уровня УУ прибора П-321М. Результаты измерения в децибелах округлялись до ближайшего целого значения. Некоторый спад АЧХ всех трех преобразователей на частотах выше 14 кГц обусловлен ограниченным диапазоном рабочих частот телефонного капсюля, используемого в качестве точечного источника звукового сигнала, вызванным влиянием индуктивности его катушки и выходным сопротивлением генератора.

При испытании пьезоэлектрического преобразователя подключение датчика к предварительному усилителю осуществлялось через истоковый повторитель на полевом транзисторе, согласующий высокое выходное сопротивление датчика с входным сопротивлением усилителя [33, с. 112–130].

При испытании преобразователя на основе электродинамического громкоговорителя, для исключения воспроизведения звуков и вибраций, передающихся через межэтажные перекрытия помещения

вследствие высокой чувствительности, динамическая головка eas15s02m устанавливалась магнитной системой на вибропоглощающий мат из поролона низкой плотности толщиной 60 мм.

Процедура записи производилась в соответствии с рекомендациями по записи вибрационной коммуникации насекомых и показана на рисунке 2 [15, с. 38–42; 19, с. 320–335; 22, с. 131–140; 23, с. 23–25].

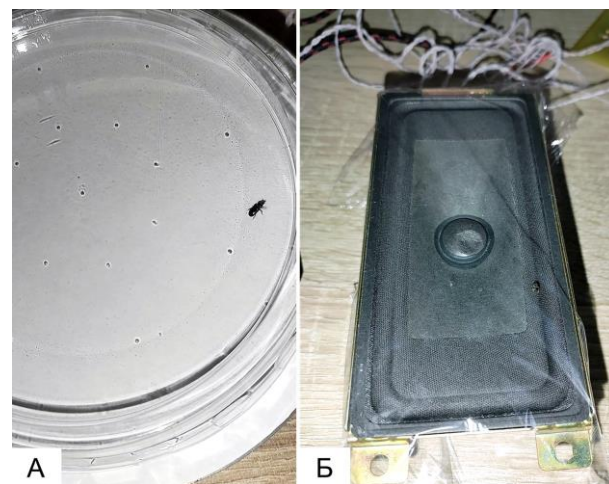


Рисунок 2 – Процедура записи вибрационных сигналов *H. fenestratus*:
А – на электромагнитном звукоснимателе;
Б – на электродинамической головке eas15s02m

После того, как самец или самка были помещены на поле записи, сверху накрывали полипропиленовым пакетом или прозрачной крышкой, предотвращая побег насекомого. Запись производилась в течение полутора минут, в трехкратной повторности. Итоговое количество измерений звуковых сигналов для самцов *H. fenestratus* составило $n = 26$, самок *H. fenestratus* $n = 34$. Данные сохранялись в видеофайлах WAV на ноутбуке (модель HP Pavilion g series, США). Для записи звука использовалась программа Sony Sound Forge Pro 10.0, для очистки звуков от фонового шума использовалась программа Adobe Audition CC 12.1. Для самцов и самок изучаемого вида анализировали диапазон издаваемых частот, который визуализировали графически. В каждом из графиков проведен анализ на соответствие нормальному распределению и проведена проверка на критерий Шапиро–Уилка (W , при уровне значимости $p > 0,01$). Для стрессового сигнала посчитаны параметры среднего значения временных характеристик (длительность сигнала, длительность импульса и межимпульсный интервал). Для средних значений (M) считали стандартное отклонение ($\pm SD$). Обработку данных проводили в программе Statistica (ver. 10.0; Statsoft; USA).

Результаты и обсуждение

В ходе лабораторных испытаний нами было записано 18 стрессовых сигналов исследуемого вида с помощью пьезоэлектрической головки типа ГЗК-661, 21 стрессовый сигнал с помощью электромагнитной головки типа ГЗМ-105 и 34 стрессовых сигнала самки 26 стрессовых сигналов самцов с помощью динамической головки eas15s02m. Было проанализировано 176 значений стрессовых сигналов для самца и 189 для самок. Полученные графики показывают, что

наши значения близки к нормальному распределению (рис. 3, 4).

Для самцов *H. fenestratus* разброс доминантной частоты составил от 857,29 до 1002,01 Гц. В среднем доминантная частота для данного вида равна $920,38 \pm 31,79$ Гц ($W = 0,98$, $p > 0,01$). При этом, согласно рисунку 3, диапазон наибольшей встречаемости составил от 860 до 960 Гц. Наименьшая встречаемость характерна для диапазона от 857,29 до 860 Гц и от 960 до 1002,1 Гц.

Для самок *H. fenestratus* разброс доминантной частоты составил от 898,04 до 1189,12 Гц. В среднем доминантная частота для данного вида равна $1040,19 \pm 49,73$ Гц ($W = 0,99$, $p > 0,01$). Диапазон наибольшей встречаемости вибрационного сигнала стресса составил от 1000 до 1100 Гц, реже стрессовые сигналы встречаются в диапазоне 950–1000 Гц. Наименьшая встречаемость характерна для диапазона от 898,04 до 950 Гц и 1100 до 1189,12 Гц.

Для самцов характерны более размазанные значения доминантной частоты, нежели чем для самки. Нижняя граница наибольшей встречаемости самок (1000 Гц) не пересекается с верхней границей наибольшей встречаемости самцов (960 Гц.). Самцы, активнее потираю задним бедром о поверхность первого брюшного сегмента, что и является, по-видимому, причиной такой размазанной доминантной частоты. Временные характеристики (длительность сигнала, длительность импульса и межимпульсный сигнал) позволяют определить тот уникальный сигнал, который неповторим и является видоспецифичным. В таблице 1 представлены характеристики для исследуемых видов.

Длительность сигнала и длительность импульса для самцов имеет большие значения ($0,185 \pm 0,023$ с и $0,019 \pm 0,001$ с соответственно), нежели чем для самок ($0,162 \pm 0,045$ с и $0,018 \pm 0,004$). При этом межимпульсный интервал имеет обратную зависимость, самки дольше молчат между сигналами, нежели чем самцы ($0,79 \pm 0,01$ с и $0,73 \pm 0,02$ с). Сравнивая временные характеристики звуковых сигналов самцов и самок, мы видим, что диапазоны длительности сигналов и длительности импульсов у вторых шире. Вероятно, это связано с элементами вибрационной коммуникации, которые не всегда можно приписать к стрессовому сигналу, несмотря на модели-

рование стрессовых условий. При этом диапазон межимпульсного интервал у самцов несколько шире.

В результате проведенных экспериментов удалось найти преобразователь, сочетающий в себе высокую чувствительность при низком выходном сопротивлении. В качестве такого преобразователя было принято решение использовать широкополосную электродинамическую головку прямого излучения в варианте микрофона.

Разница между микрофоном в классическом понимании и предложенным преобразователем заключается в том, что микрофон преобразует в электрический сигнал звуковое давление волны, распространяющейся в воздухе, а предложенный мною преобразователь преобразует в электрический сигнал вибрации диффузора от точечного источника, находящегося в непосредственном контакте с поверхностью этого диффузора.

В ходе проведенных экспериментов лучше всех в качестве акустико-электрического преобразователя зарекомендовала себя динамическая головка eas15s02m производства Technics, Япония. Динамическая головка испытывалась с линейным предварительным усилителем (без корректирующего фильтра), имеющим коэффициент усиления по напряжению 48 dB.

Объективные измерения показали, что при включении динамической головки в микрофонном режиме уровень шумов на выходе предварительного усилителя оказался более чем на 6 dB ниже, а отношение сигнал/шум более чем на 18 dB лучше, чем при подключении к усилителю электромагнитной головки звукоснимателя типа ГЗМ-105.

На рисунке 5 показаны осциллограммы и сонограммы стрессовых сигналов исследуемого вида *H. fenestratus*. Как видно из данного рисунка, используя для записи пьезоэлектрическую головку типа ГЗК-661 и вторую на основе электромагнитной головки типа ГЗМ-105, в шумах практически невозможно услышать или рассмотреть полезный сигнал. При попытке очистить данные шумы полезный сигнал удаляется также. Использование динамической головки eas15s02m позволило достаточно четко услышать стрессовые сигналы данного вида, а также минимизировать очистку звукового сигнала, где может находиться полезный сигнал.

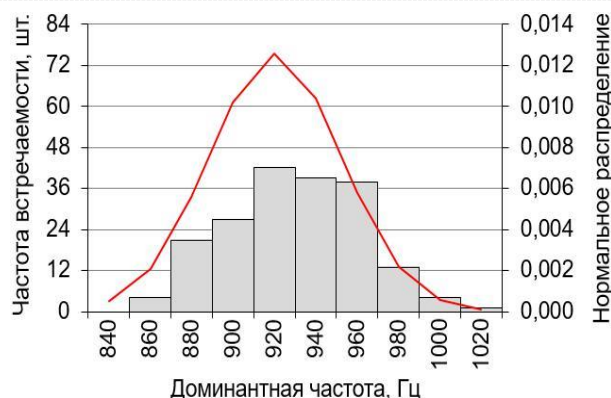


Рисунок 3 – Диапазоны частот (Гц) для звуков стресса самцов *H. fenestratus*

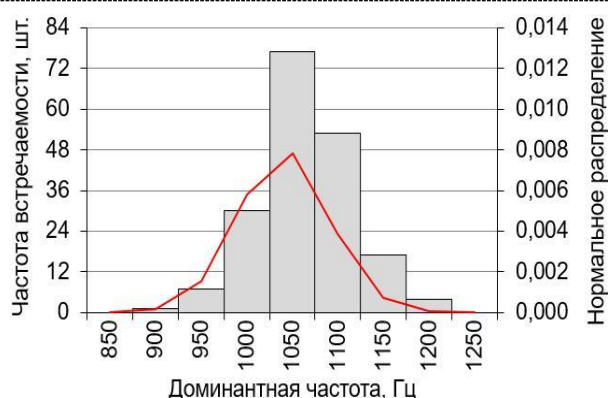
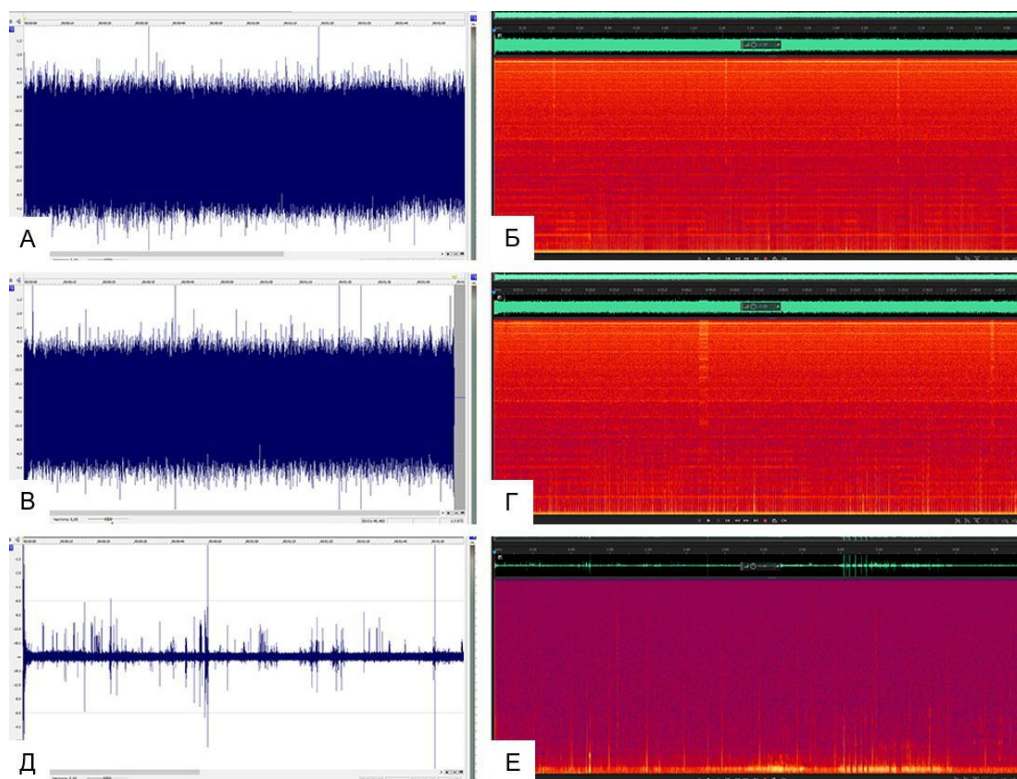


Рисунок 4 – Диапазоны частот (Гц) для звуков стресса самок *H. fenestratus*

Таблица 1 – Временные характеристики звуковых стрессовых сигналов самок и самцов *H. fenestratus*

Вид	Длительность сигнала, с		Длительность импульса, с		Межимпульсный интервал, с	
	Диапазон	М ± SD	Диапазон	М ± SD	Диапазон	М ± SD
<i>H. fenestratus</i> ♂	0,130–0,240	0,185 ± 0,023	0,016–0,022	0,019 ± 0,001	0,68–0,77	0,73 ± 0,02
<i>H. fenestratus</i> ♀	0,068–0,307	0,162 ± 0,045	0,008–0,029	0,018 ± 0,004	0,76–0,81	0,79 ± 0,01

**Рисунок 5** – Осциллограммы и сонограммы стрессовых сигналов *H. fenestratus*, выполненные преобразователем на основе: А, Б – пьезоэлектрического звукоснимателя; В, Г – электромагнитного звукоснимателя; Д, Е – электродинамической головки eas15s02m

Преобразователь на основе динамической головки обладает высокой чувствительностью (на 13 dB выше, чем у преобразователя на основе электромагнитного звукоснимателя, и на 21 dB выше, чем у пьезоэлектрического), низким уровнем шума (реальный уровень шума ниже минимального порога измерения – 60 dB), достаточной линейностью чувствительности в рабочем диапазоне частот и отсутствием фазовых искажений.

Экранированная магнитная система динамической головки обеспечивает высокую магнитную индукцию в рабочем зазоре и нечувствительность к наводкам от внешних электромагнитных полей.

Кроме того, исследователю не требуется проводить работы по самостоятельному изготовлению и настройке преобразователя, динамическая головка громкоговорителя представляет собой законченную конструкцию и все необходимые элементы преобразователя уже присутствуют в ней:

- диффузор головки выполняет функцию мембраны – плоского волновода для передачи вибраций;
- катушка, являющаяся источником ЭДС, жестко соединена с диффузором, что исключает потерю механического контакта, выводы катушки имеют удобные клеммные разъемы.

Динамические головки подобного типа относительно недорогие и доступны для приобретения через розничную торговую сеть либо на вторичном рынке. Сборка предварительного усилителя не вы-

зывает затруднений у подготовленного исследователя, а все детали для усилителя не дефицитны.

Список литературы:

1. Морозов В.П., Занимательная биоакустика. Изд. 2-е, доп., перераб. М.: Знание, 1987. 208 с.
2. Romer H. Environmental and biological constraints for the evolution of long-range signaling and hearing in acoustic insects // Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences. 1993. Vol. 340. P. 179–185. DOI: 10.1098/rstb.1993.0056.
3. Forrest T.G. Acoustic communication and baffling behaviors of crickets // The Florida Entomologist. 1982. Vol. 65, iss. 1. P. 33–44. DOI: 10.2307/3494144.
4. van Staaden M.J., Romer H. Sexual signalling in bladder grasshoppers: tactical design for maximizing calling range // Journal of Experimental Biology. 1997. Vol. 200, iss. 20. P. 2597–2608. DOI: 10.1242/jeb.200.20.2597.
5. Aicher B., Tautz J. Vibrational communication in the fiddler crab, *Uca pugilator*. 1. Signal transmission through the substratum // Journal of Comparative Physiology A: Sensory, Neural, and Behavioral Physiology. 1990. Vol. 166. P. 345–353. DOI: 10.1007/bf00204807.
6. Жантеев Р.Д. Биоакустика насекомых. М.: Изд-во МГУ, 1981. 256 с.
7. Wessel A. Stridulation in the Coleoptera – an overview // Insect sounds and communication Physiology, behavior, ecology and evolution / eds. S. Drosopoulos, M.F. Claridge. London; New York: Taylor & Francis; Boca Raton, 2006. P. 397–403.

8. Van Tassell E.R. An audiospectrographic study of stridulation as an isolating mechanism in the genus *Berosus* (Coleoptera: Hydrophilidae) // Annals of the Entomological Society of America. 1965. Vol. 58, iss. 4. P. 407–413. DOI: 10.1093/aesa/58.4.407.

9. Schuster J.C. Acoustical signals of passalid beetles: complex repertoires // Florida Entomologist. 1983. Vol. 66, iss. 4. P. 486–496. DOI: 10.2307/3494020.

10. Reyes-Castillo P., Jarman M. Some notes on larval stridulation in neotropical Passalidae (Coleoptera: Lamellicornia) // The Coleopterists Bulletin. 1980. Vol. 34, iss. № 3. P. 263–270.

11. Schmitt M., Traue D. Morphological and bioacoustic aspects of stridulation in Criocerinae (Coleoptera, Chrysomelidae) // Zoologischer Anzeiger – a Journal of Comparative Zoology. 1990. Vol. 225, iss. 5/6. P. 225–240.

12. Kerchev I.A. Interspecific differences of stridulatory signals in three species of bark beetles from the genus *Poligraphus* Er. (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) inhabiting the island of Sakhalin // PeerJ. 2020. DOI: 10.7717/peerj.8281.

13. Di Giulio A., Maurizi E., Barbero F., Sala M., Fattorini S., Balletto E., Bonelli S. The pied piper: a parasitic beetle's melodies modulate ant behaviours // PLoS One. 2015. Vol. 10, iss. 7. DOI: 10.1371/journal.pone.0130541.

14. Рига Е.Ю., Аникин В.В. Акустические сигналы при коммуникации муравьев рода *Formica* (Hymenoptera: Formicidae) и жуков рода *Scydmaenus* (Coleoptera: Staphylinidae) // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Химия. Биология. Экология. 2016. Т. 16, вып. 4. С. 428–433. DOI: 10.18500/1816-9775-2016-16-4-428-433.

15. Шестаков Л.С., Эль Хашаш А. Перспективы использования данных о вибрационной коммуникации для разработки безопасных методов контроля численности насекомых // Сенсорные системы. 2021. Т. 35, № 1. С. 38–42. DOI: 10.31857/s023500922101008x.

16. Yack J.E., Smith M.L., Weatherhead P.J. Caterpillar talk: acoustically mediated territoriality in larval Lepidoptera // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2001. Vol. 98, iss. 20. P. 11371–11375. DOI: 10.1073/pnas.191378898.

17. Yack J.E. The structure and function of auditory chordotonal organs in insects // Microscopy Research & Technique. 2004. Vol. 63, iss. 6. P. 315–337. DOI: 10.1002/jemt.20051.

18. Hofstetter R.W., Aflitto N., Bedoya C.L., Yturralde K., Dunn D.D. Vibrational behavior in bark beetles: applied aspects // Biotremology: studying vibrational behavior / eds. P.S.M. Hill, R. Lakes-Harlan, V. Mazzoni, P.M. Narins, M. Virant-Doberlet, A. Wessel. Cham: Springer Nature, 2019. P. 415–435. DOI: 10.1007/978-3-030-22293-2_21.

19. Шестаков Л.С. Сравнительный анализ вибрационных сигналов 16 видов клопов-щитников семейства Pentatomidae (Heteroptera) // Зоологический журнал. 2015. Т. 94, № 3. С. 320–335. DOI: 10.7868/s0044513415030125.

20. Бенедиктов А.А. Акустическая сигнализация прыгучиков рода *Tetrix* (Orthoptera, Tetrigidae) // Зоологический журнал. 1998. Т. 77, № 9. С. 1021–1025.

21. Бенедиктов А.А. Новые данные о вибросигнализации прямокрылых семейства Tetrigidae (Orthoptera) // Устойчивое развитие континента Азия. Функциональная экология. Биосферные исследования: тр. VII Убсунурского междунар. симпозиума. 20–24 сентября 2001 г., г. Кызыл / отв. ред. В.В. Бугровский, В.С. Хруцкий. М.: Слово, 2002. С. 97–106.

22. Бенедиктов А.А. Вибрационные сигналы прямокрылых насекомых семейства Tetrigidae (Orthoptera) // Труды Русского энтомологического общества. 2005. Т. 76. С. 131–140.

23. Бенедиктов А.А. Вибрационные сигналы прыгунчика *Paratettix ivarovi* Semenov, 1915 (Orthoptera: Tetrigoidea) из Теберды (Россия) // Кавказский энтомологический бюллетень. 2014. Т. 10, № 1. С. 23–25.

24. Гаранин М.В., Журавлев В.И., Кунегин С.В. Системы и сети передачи информации: учеб. пособие. М.: Радио и связь, 2001. 336 с.

25. Шкритек П. Справочное руководство по звуковой схемотехнике: методы расчета, способы измерений разработка схем, цифровая обработка звуковых сигналов / пер. с нем. И.Д. Гурвица. М.: Мир, 1991. 446 с.

26. Зернов Н.В., Карпов В.Г. Теория радиотехнических цепей. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1972. 816 с.

27. Sazhnev A.S. On the position of Heteroceridae (Insecta: Coleoptera) in food webs in riparian communities // Ecosystem Transformation. 2018. Vol. 1, № 1. P. 49–56. DOI: 10.23859/estr-180121.

28. Greenfield M.D. Evolution of acoustic communication in insects // Insect Hearing. Vol. 55 / eds. G. Pollack, A. Mason, A. Popper, R. Fay. Cham: Springer, 2016. P. 17–47. DOI: 10.1007/978-3-319-28890-1_2.

29. Erichson W.F. Heteroceridae MacLeay // Naturgeschichte der Insecten Deutschlands. Coleoptera. Berlin, 1848. Bd. 3, № 1. P. 538–551.

30. Schiodte J.C. On the tunneling coleopterous genera *Bledius*, *Heterocerus*, *Dyschirius*, and their Danish species // Annals and Magazine of Natural History. 1867. Vol. 20, iss. 115. P. 30–43. DOI: 10.1080/00222936708562714.

31. Gahan C.J., Gahan C.J.X. Stridulating organs in Coleoptera // Transactions of the Royal Entomological Society of London. 1900. Vol. 48, № 3. P. 433–452.

32. Голуб В.Б., Цуриков М.Н., Прокин А.А. Коллекции насекомых: сбор, обработка и хранение материала. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2012. 339 с.

33. Волощенко Ю.И., Мартюшев Ю.Ю., Никитина И.И. Основы радиоэлектроники: учеб. пособие / под ред. Г.Д. Петрухина. М.: Изд-во МАИ, 1993. 415 с.

Статья публикуется при поддержке гранта РФФИ «Биоакустические особенности сигналов околотоводных и водных жесткокрылых (Coleoptera: Hydrophilidae, Heteroceridae) в контексте их поведения» (проект № 20-34-90022).

Информация об авторе(-ах):	Information about the author(-s):
Родионова Елена Юрьевна, преподаватель кафедры зоологии; Кубанский государственный университет (г. Краснодар, Российская Федерация). E-mail: rigaey@gmail.com.	Rodionova Elena Yurievna, lecturer of Zoology Department; Kuban State University (Krasnodar, Russian Federation). E-mail: rigaey@gmail.com.

Для цитирования:

Родионова Е.Ю. Сравнительная характеристика записывающих устройств для вибрационных сигналов на примере *Heterocerus fenestratus* (Thunberg, 1784) (Coleoptera: Heteroceridae) // Самарский научный вестник. 2023. Т. 12, № 1. С. 111–116. DOI: 10.55355/snv2023121117.