
НЕКОТОРЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИГНАЛА ТРЕВОГИ ЧИБИСА (*VANELLUS VANELLUS*)

А.Н. Варакин¹, О.Л. Силаева²

¹Научно-исследовательский центр распознавания образов
ул. Профсоюзная, 84/32 строение 14, Москва, Россия, 117485

²Учреждение Российской Академии наук
Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН
Ленинский пр., 33, Москва, Россия, 119071

С помощью методов речевого анализа исследовали сигналы тревоги трех особей чибиса (*Vanellus vanellus*), принадлежащих трем разным популяциям. Во временной области голосовые различия особей проявляются в просодических характеристиках, таких как среднее значение и дисперсия основного тона, а также распределение энергии во времени. В спектральной области эти отличия связаны с особенностями работы артикуляционного аппарата, они проявляются в разных движениях формантных треков относительно друг друга. Установлена схожесть изменения траектории частоты основного тона, расположение первой форманты примерно на одной и той же частоте, схожесть движения формантных треков и стабильность первой форманты.

Однако для окончательных выводов по индивидуальным, географическим и видоспецифическим характеристикам сигнала нужна гораздо большая статистика, чем имеется у нас на настоящий момент.

Ключевые слова: биоакустика, вокализация птиц, индивидуальная изменчивость сигнала, идентификация по голосу, основной тон.

Несмотря на большие достижения в области биоакустики, до сих пор не удается точно выявить видоспецифические, популяционные и индивидуальные особенности голоса животного. При этом специалисты биоакустики признали, что система коммуникации животных не примитивна, просто она обслуживает ситуации, отличные от коммуникативных потребностей человека. В некоторых аспектах она сложнее человеческой коммуникации, а ее паралингвистические характеристики обширнее [8; 10; 11; 14].

Проблема идентификации особи по голосу очень актуальна для многих направлений зоологии и орнитологии в частности. Для орнитологии это не только теоретические и прикладные аспекты вокализации птиц, но и фаунистические, мониторинговые исследования, а также изучение миграций.

Материал, метод, понятия и терминология. Исследовали сигналы тревоги трех особей чибиса, издаваемых птицами, находящимися у гнезд на земле и в полете (все записи сделаны в мае) [4]. Сигналы принадлежали птицам из разных популяций: *особь 1* — беспокойство (длительность — 0,763 сек.) — Казань; *особь 2* — беспокойство в полете (длительность — 0,817 сек.) — Курганская обл.; *особь 3* — тревога на земле ночью (длительность — 0,677 сек.) — Челябинская область. При исследовании мы частично использовали методы речевого анализа [6; 7; 11; 14] и терминологию, принятую в языкознании, так как принципы организации речи человека и птицы во многом сходны [5; 7—9; 13].

Формантный анализ включает определение частот, амплитуд и добротностей формант, траекторий (треков) формантных максимумов (ФМ), соотношений формантных и локальных максимумов (ЛМ), а также гармоник основного тона (ОТ).

Анализ временных структур. Первым этапом работы была разметка сигналов синхронно с периодами ОТ. Частота основного тона (F_{OT}) рассчитывается для каждого выделенного периода ОТ путем деления частоты дискретизации Fd на длину периода d .

$$F_{OT} = \frac{Fd}{d}. \quad (1)$$

Энергия Ei за период ОТ, рассчитывается на каждом i -ом периоде по формуле (2), и, по сути, является площадью под кривой.

$$E = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^d T_i^2}}{d}, \quad (2)$$

где T_i — значения сигнала; d — интервал на выделенном периоде ОТ.

Частота ОТ и энергия сигнала за период E определяются нами во временной области и являются просодическими характеристиками сигнала тревоги чибиса.

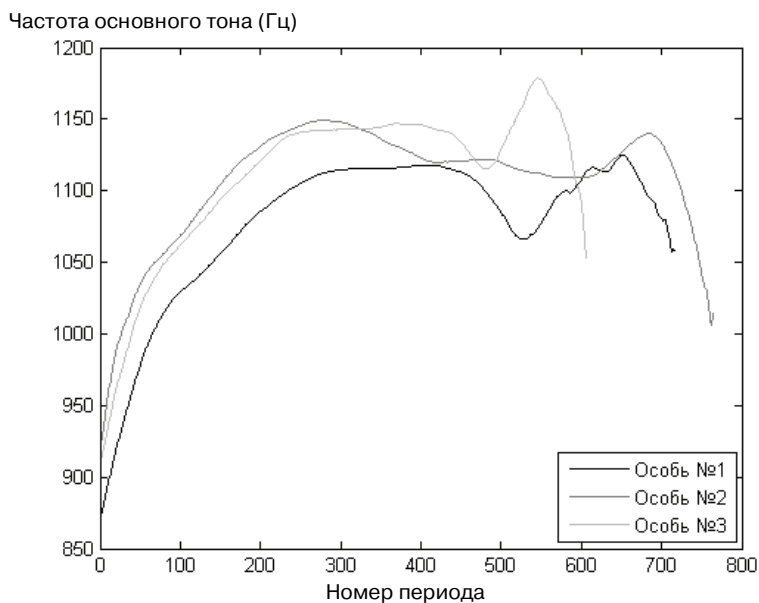


Рис. 1. Изменение частоты основного тона во времени

На рис. 1 видно, что темп и длительность вокализации у всех изученных особей разная, соответственно имеется разное количество периодов. Для всех трех особей сохраняется тенденция повышения F_{OT} до 300-го периода, затем у второй особи наблюдается резкое снижение F_{OT} от 300-го до 400-го периода. Первая и третья особь на протяжении примерно 100 периодов поддерживают F_{OT} на преж-

нем уровне, понижение происходит после 400-го периода, причем для второй особи, находящейся в полете, провал по F_{OT} не столь значителен, зато он имеет максимальную продолжительность. Несмотря на то, что длительность звучания сигнала у всех особей разная, траектории изменения F_{OT} схожи. Сначала наблюдается увеличение F_{OT} , небольшой спад, а затем резкий подъем перед завершением сигнала.

Энергия во всех сигналах сильно колеблется, примерно на 300-м периоде зафиксировано максимальное значение у первой и второй особей. Кроме того, на графике энергий замечен резкий всплеск в конце сигнала у второй особи, который отсутствует у двух других, что носит выраженный характер артикуляции у данной особи.

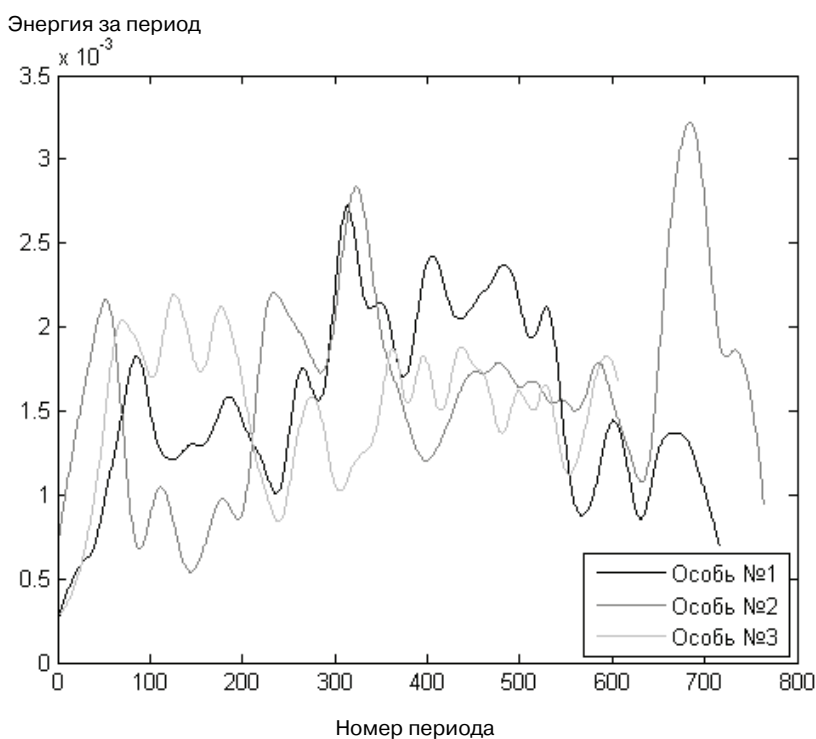


Рис. 2. Изменение уровня энергии во времени

Анализ спектральных характеристик. Для выявления характеристик в спектральной области мы построили спектрально-временные картины акустических сигналов в трехмерном пространстве. С этой целью были использованы финитные свойства преобразования Фурье, которое основано на спектральном разложении синхронно с периодом ОТ. Поскольку быстрое преобразование Фурье требует, чтобы размерность окна анализа на входе соответствовала значению 2^n , то выбор его ширины однозначно связан с требуемым частотным разрешением.

Анализ сигнальной информации в спектрально-временной области позволяет увидеть более содержательную картину. Она представлена несколькими ЛМ определенной добротности, которые имеют различную амплитуду и расположены

на определенных частотах. Мгновенный спектр позволяет сделать спектральный срез во времени и увидеть ЛМ, связанные с гармониками функции возбуждения. Среди набора ЛМ присутствуют значимые ЛМ, т.е. формантные максимумы, добротность которых у каждой особи своя.

Поэтому следующей задачей было определение частоты и амплитуды формантных треков. Для выявления формантных треков проведена обработка спектрально-временные картины. Такая обработка позволяет «вытянуть» и «сузить» ЛМ таким образом, чтобы поведение их во времени становилось более явным, а выделение более простым. Это реализуется за счет свертки ядра специального вида со спектрально-временной матрицей. Экспериментально было определено, что наилучший результат свертки получается, когда между ядрами свертки сдвиг равен двум элементам разрешения.

Свертка осуществляется дважды: свертка исходной матрицы A , с ядром специального вида, результатом которой является матрица A^* , повторная свертка ядра с матрицей A^* формирует матрицу A^{**} . Таким образом, дважды осуществив свертку, удается добиться более явного выделения ЛМ на спектрально-временных картинах акустических сигналов (рис. 3).

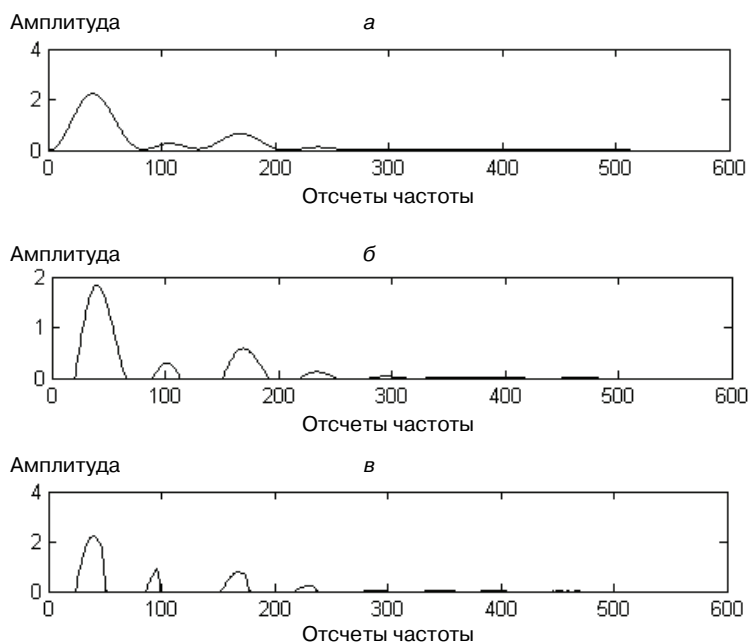


Рис. 3. Мгновенные спектры:

- а) исходной матрицы; б) после первой свертки;
- в) после второй свертки

После свертки исходной матрицы ЛМ стали более узкими и отчетливыми, что облегчило процедуру прослеживания формантных треков. Выявление формантных треков осуществляется путем нахождения максимальных значений матрицы A^{**} на определенных промежутках отсчетов частоты (рис. 4).

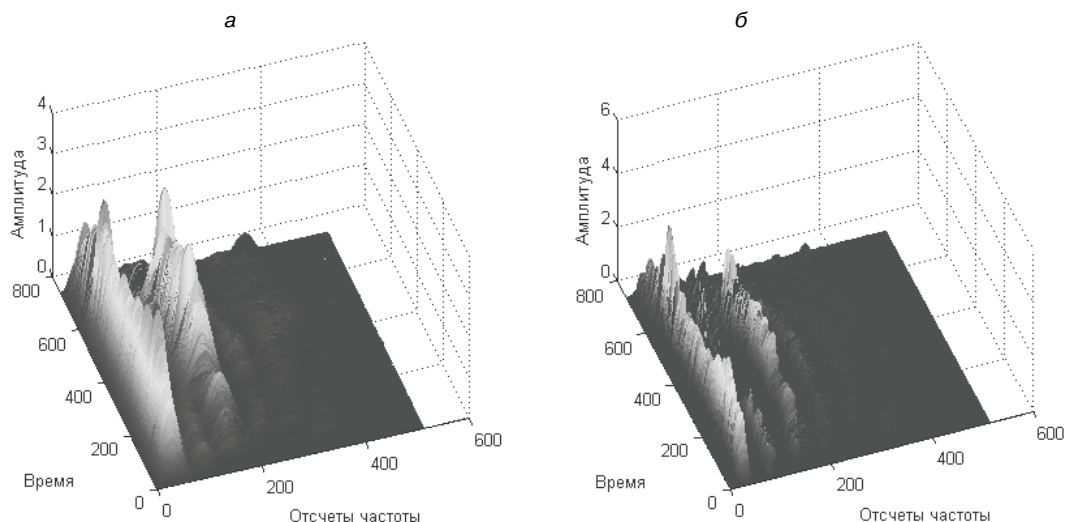


Рис. 4. Спектрально-временные картины:
а) исходной матрицы; б) матрицы после свертки

С помощью цикла сверток на каждой спектрально-временной картине выявляются первые пять максимальных значений. Изменения максимальных значений во времени есть формантные треки. Однако выделенные формантные треки представлены по отсчетам частоты, отсчеты нужно перевести в реальную частоту. Для этого отсчеты частоты умножаются на шаг квантования. Шаг квантования найдем по формуле (3).

$$H_{kv} = \frac{Fd}{M}, \quad (3)$$

где Fd — частота дискретизации после децимации; M — ширина окна спектрального анализа.

Формантные треки изменяются во времени также и по амплитуде (рис. 5). Поскольку длина акустических сигналов различается, производится совмещение треков для всех особей таким образом, чтобы их наиболее значимые ЛМ совпадали. Это достигается путем удаления и/или добавления элементов, не принадлежащих ЛМ. Кроме того, производится медианное сглаживание, так как амплитуда на протяжении сигнала резко изменяется.

Анализ рис. 5 показывает, что по своим изменениям во времени формантные треки особей в основном схожи между собой, однако имеются и некоторые различия, которые определяют индивидуальные и/или популяционные особенности голоса.

На рис. 6 представлены примеры парных зависимостей между формантами, которые однозначно подтверждают общий фонетический строй и подчеркивают голосовые особенности. Здесь под фонетическим строем понимается парное распределение формантных областей, которое четко структурировано и локализовано в выбранном нами пространстве. Если учесть движение некоторой материальной точки во времени и в пространстве двух или тем более четырех формант, то особенности голоса могут оказаться более яркими в обмене информацией.

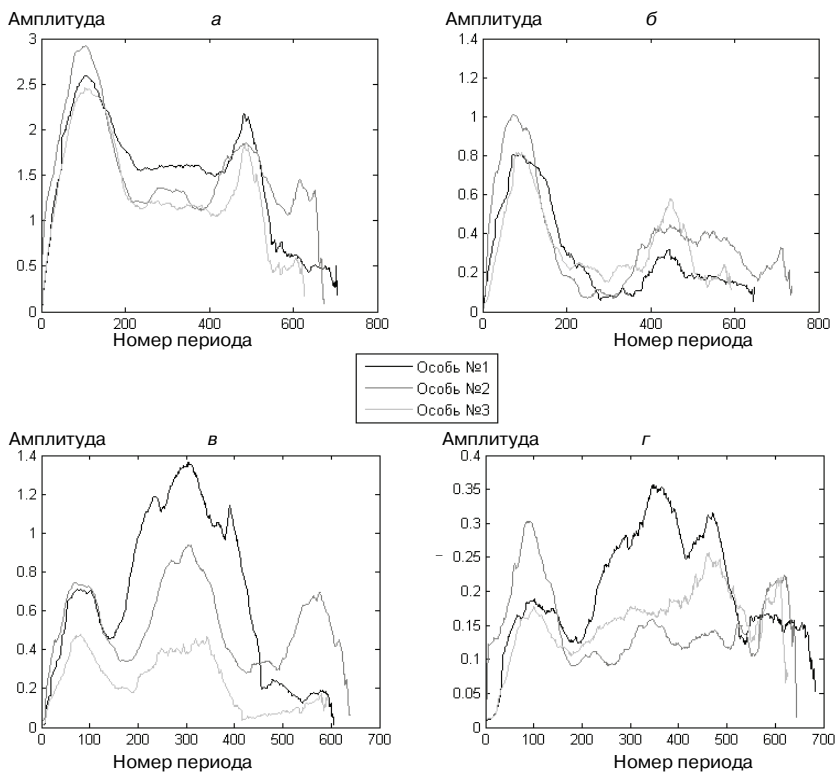


Рис. 5. Изменение амплитуды формантных треков во времени для каждой особи: а) первой форманты; б) второй форманты; в) третьей форманты; г) четвертой форманты

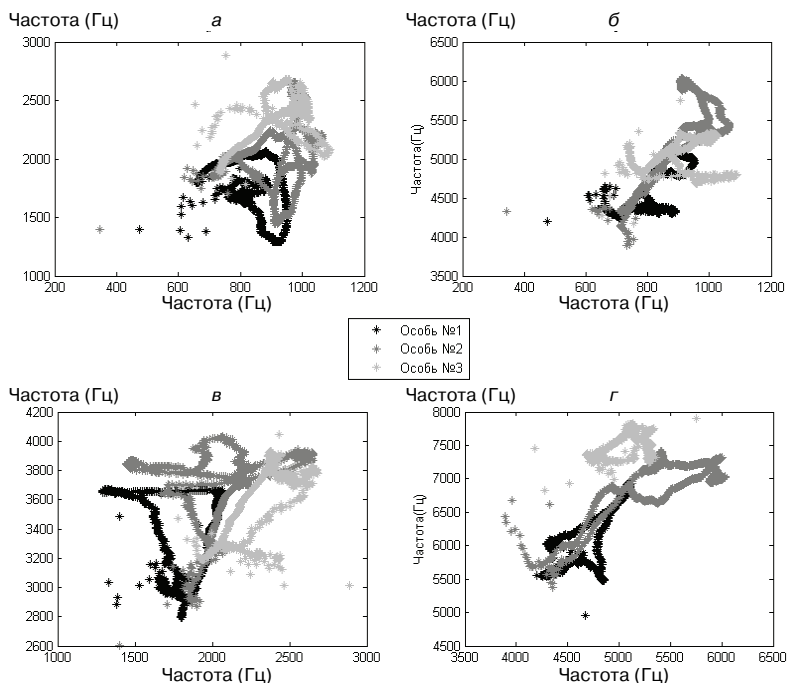


Рис. 6. Частотные зависимости между формантами: а) зависимость частоты второй форманты от первой; б) зависимость частоты четвертой форманты от первой; в) зависимость частоты третьей форманты от второй; г) зависимость частоты пятой форманты от четвертой

Графики парных зависимостей формантных треков по частоте являются наиболее показательными, здесь хорошо видны видоспецифические характеристики для всех трех особей, а также особенности голоса всех исследованных особей.

Таким образом, различия в голосах птиц проявляются как во временной, так и в спектральной областях, причем во временной области голосовые различия проявляются в просодических характеристиках, таких как среднее значение и дисперсия OT , а также распределение энергии во времени.

В спектральной области эти отличия связаны с особенностями работы артикуляционного аппарата, они проявляются в разных движениях формантных треков относительно друг друга. Эти характерные для всех формант различия указывают на высокую степень индивидуализации голосовых проявлений каждой особи.

Наше исследование, однако, выявило и общие для всех сигналов черты, которые также представляют значительный интерес. Они характеризуют особенности видоспецифического сигнала, которые в случае их изменения могут изменить сигнал до неузнаваемости партнерами по виду, в частности самкой в период создания пар; в результате может быть нарушен механизм репродуктивной изоляции вида.

Итак, общим для всех трех особей является схожесть изменения траектории $F_{от}$ — вплоть до 300-го периода сохраняется тенденция ее повышения, затем следует небольшой спад, и перед завершением сигнала снова подъем; расположение первой форманты примерно на одной и той же частоте; схожесть движения формантных треков; стабильность первой форманты.

Следует отметить недостаточность имеющегося у нас материала, чтобы сделать окончательные выводы по индивидуальным, географическим и видоспецифическим характеристикам сигнала. Нужна большая статистика.

Авторы выражают благодарность А.А. Шегаю за инженерную помощь.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вараксин А.Н., Силаева О.Л. Фонемный анализ на базе нового акустического анализатора // Вестник РУДН. Серия Экология и безопасность жизнедеятельности. — 1997. — № 2. — С. 105—111.
- [2] Вараксин А.Н., Силаева О.Л. Комплексный анализатор техногенных и природных звуков. — М.: ЭФМАГ, 1998.
- [3] Вараксин А.Н., Силаева О.Л. Характеристики акустического сигнала птицы на примере негативной вокализации чибиса (*Vanellus vanellus*) // Труды XXVII сессии Российского акустического общества, Санкт-Петербург, 16—18 апреля 2014 г. (<http://rao.akin.ru/Rao/sess27/вараксин.pdf>).
- [4] Голоса птиц России. Фонотека голосов животных им. проф. Б.Н. Вепринцева. СД-диск. 2007. Ч. 1.
- [5] Ильичев В.Д., Силаева О.Л. Сопоставление видовых сигналов животных и речевых сигналов человека // Труды XI сессии Российского акустического общества. «Акустика речи. Медицинская и биологическая акустика». — М., 2001. — Т. 3. — С. 70—73.
- [6] Силаева О.Л. Говорящие птицы как объект экологической биоакустики и биолингвистики // Вестник РАН. — 1997. — Т. 67. — № 9. — С. 829—833.

- [7] *Силаева О.Л.* Социально-экологические и биолингвистические аспекты звуковых имитаций птиц: Автореф. дисс. ... докт. биол. наук. — М., 1998.
- [8] *Силаева О.Л.* Сравнительный анализ акустических характеристик речевых моделей-прототипов человека и имитонов волнистых попугайчиков (*M. undulatus*) // Известия РАН. Сер. биол. — 1998. — № 1. — С. 47—54.
- [9] *Силаева О.Л.* Сопоставительный анализ голоса птицы-имитатора и человека-донора // Доклады РАН. — 1998. — Т. 360. — № 1. — С. 138—140.
- [10] *Силаева О.Л.* Звукоподражание: наука и практика. — М.: Сельсин АСБ, 2008.
- [11] *Силаева О.Л., Вараксин А.Н., Ильичев В.Д.* Имитационные взаимоотношения между человеком и животными. — М.: РУДН, 1999.
- [12] *Силаева О.Л., Ильичев В.Д., Дубров А.П.* Анализ речевых сигналов птицы, собаки и кошки // Сознание и физическая реальность. — М., 2003. — Т. 8. — № 6. — С. 41—46.
- [13] *Силаева О.Л., Золотарев С.С.* Диапазоны слуха и голоса некоторых видов птиц // Актуальные проблемы экологии и природопользования. — М.: РУДН, 2014. — С. 98—101.
- [14] *Koehler O.* Vorbedingungen und Vorstufen unserer Sprache bei Tieren // Verh. dt. Zool. Ges. Tübingen. 1954. S. 327—341.

LITERATURA

- [1] *Varaksin A.N., Silaeva O.L.* Fonemnyj analiz na baze novogo akusticheskogo analizatora // Vestnik RUDN. — 1997. — № 2. — С. 105—111.
- [2] *Varaksin A.N., Silaeva O.L.* Kompleksnyj analizator tehnogennyh i prirodnyh zvukov. — М.: JeFMAG, 1998. S. 82—83.
- [3] *Varaksin A.N., Silaeva O.L.* Harakteristiki akusticheskogo signala pticy na primere negativnoj vokalizacii chibisa (*Vanellus vanellus*) // Trudy XXVII sessii Rossijskogo akusticheskogo obshhestva, Sankt-Peterburg, 16—18 aprelya 2014 g. (<http://rao.akin.ru/Rao/sess27/varaksin.pdf>).
- [4] Golosa ptic Rossii. Fonoteka golosov zhivotnyh im. prof. B.N. Veprinceva. SD-disk. 2007. Ch. 1.
- [5] *Il'ichjov V.D., Silaeva O.L.* Sopostavlenie vidovyh signalov zhivotnyh i rechevyh signalov cheloveka // Trudy III sessii Rossijskogo akusticheskogo obshhestva. "Akustika rechi. Medicinskaja i biologicheskaja akustika". М., 2001. Т. 3. S. 70—73.
- [6] *Silaeva O.L.* Govorjashhie pticy kak ob'ekt jekologicheskoy bioakustiki i biolingvistiki // Vestnik RAN. 1997. Т. 67. № 9. С. 829—833.
- [7] *Silaeva O.L.* Social'no-jekologicheskie i biolingvisticheskie aspekty zvukovyh imitacij ptic. Avtoref. diss. ... dokt. biol. nauk. 1998.
- [8] *Silaeva O.L.* Cravnitel'nyj analiz akusticheskikh harakteristik rechevyh modelej-prototipov cheloveka i imitonov volnistyh popugajchikov (*M. undulatus*) // Izvestija RAN. Ser. biol. — 1998. № 1. С. 47—54.
- [9] *Silaeva O.L.* Sopostavitel'nyj analiz golosa pticy-imitatora i cheloveka-donora // Doklady RAN. — 1998. Т. 360. № 1. С. 138—140.
- [10] *Silaeva O.L.* Zvukopodrazhanie: nauka i praktika. — М.: Sel'sin ASB. 2008.
- [11] *Silaeva O.L., Varaksin A.N., Il'ichjov V.D.* Imitacionnye vzaimootnoshenija mezhdru chelovekom i zhivotnymi. Moskva: RUDN, 1999.
- [12] *Silaeva O.L., Il'ichjov V.D., Dubrov A.P.* Analiz rechevyh signalov pticy, sobaki i koshki // Soznanie i fizicheskaja real'nost'. Moskva, 2003. Т. 8. № 6. S. 41—46.
- [13] *Silaeva O.L., Zolotarjov S.S.* Diapazonu sluha i golosa nekotoryh vidov ptic // Aktual'nye problemy jekologii i prirodnopol'zovanija. М.: RUDN, 2014. S. 98—101.
- [14] *Koehler O.* Vorbedingungen und Vorstufen unserer Sprache bei Tieren // Verh. dt. Zool. Ges. Tübingen. 1954. S. 327—341.

SOME CHARACTERISTICS OF THE ALARM CALL OF LAPWING (*VANELLUS VANELLUS*)

A.N. Varaksin¹, O.L. Silaeva²

¹Scientific Research Center of Image Recognition
Profsoyusnaja str., 84/32, building 14, Moscow, Russia, 117485

²Institution of Russian Academy
of Sciences Severtsov Institute of Ecology and Evolution RAS
Leninsky pr., 33, Moscow, Russia, 119071

Using the methods of speech analysis there were examined alarm calls of three individuals of lapwing (*Vanellus vanellus*) belonging to three different populations. In the time domain the voice differences are manifested in prosodic features, such as the mean and variance of the basic tone, as well as the distribution of energy over time. In the spectral range the differences the peculiarities are related to the articulator apparatus, they appear in the different formant tracks movements relative to each other. Common features include. The similarity of the basic tone trajectory change, when up to 300 period, the trend of its increasing is saved, followed by a slight decline, and before the end of the signal rise again. Location of the first formant approximately on the same frequency. The similarity of movement of formant tracks. Stability of the first formant.

However, to draw final conclusions on the individual, geographical and species-specific signal characteristics need a lot more statistics than there is for the moment.

Key words: bioacoustics, vocalization of birds, individual variability of the signal, voice identification, the basic tone.