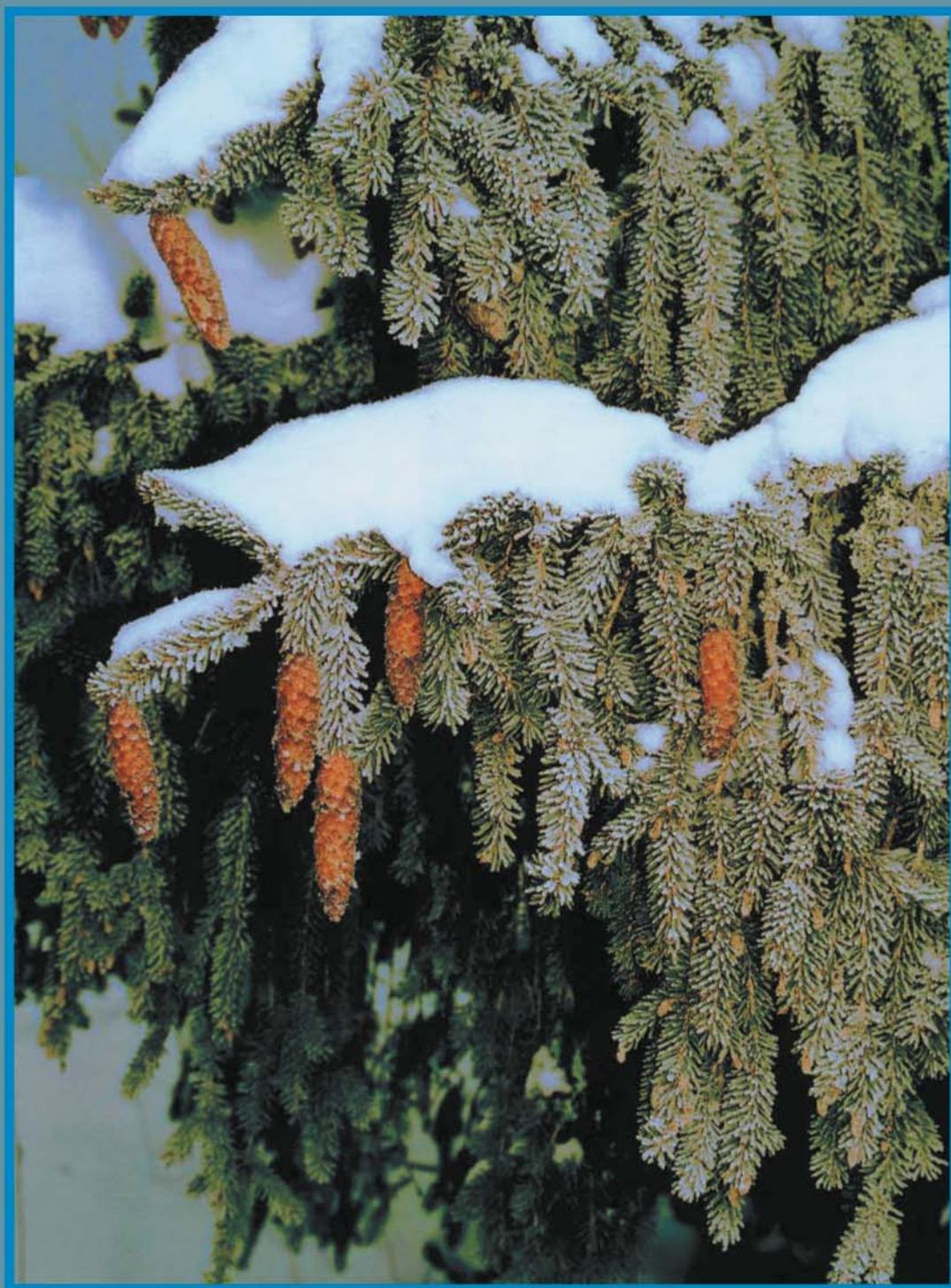


ПРИРОДА

2 06



Скромное очарование нелинейностей

О скулении собак, голосе Высоцкого, алтайском пении, и не только

И.А.Володин, Е.В.Володина

Вы могли никогда не слышать о вокальных нелинейностях, но не слышать сами вокальные нелинейности вы никак не могли. Такие явления встречаются во множестве окружающих нас звуков: будь то ломающийся голос подростка, или вопли мартовских котов, или плач младенца. Переход от нормальных звуков к звукам с нелинейностями вы тоже наверняка слышали: к примеру, во время исполнения арии незадачливым певцом, который старается взять все более высокую ноту. Звук становится все выше и тоньше. И вдруг голос срывается, давая «петуха»...

Но разве могут такие звуки представлять столь существенный интерес, чтобы ими занимался целый Институт теоретической биологии при Университете им.Гумбольдтов в Берлине? Тем не менее это так, причем там исследуют не только кашель, хрипы и дисфункции речи людей (ведь медицинские проблемы или компьютерный синтез речи выглядят вполне достойными предметами для исследования), но и всякие аномалии и сбои в звуках, издаваемых собаками, кошками и разными другими зверями! Более того, для совместных исследований нелинейных явлений сюда съезжаются специалисты разных стран и научных специализаций. В чем же тут дело?



Илья Александрович Володин, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории поведения животных кафедры зоологии позвоночных МГУ им.М.В.Ломоносова. Область научных интересов — социальное поведение млекопитающих и птиц, анализ двигательного поведения и биоакустический мониторинг популяций.



Елена Владимировна Володина, кандидат биологических наук, научный сотрудник отдела научных исследований Московского зоопарка. Занимается изучением структуры и функции звуков, механизмов звукопродукции.

А дело в том, что модели человеческого голоса и голосового аппарата птиц и зверей помогают понять закономерности проявлений законов нелинейной динамики. Это общие, глобальные законы, и поэтому они при наступлении определенных условий оказываются одинаковыми для систем, совершенно различных по своей природе. Механические пружины, эластичные голосовые связки людей и животных и даже социальные процессы вроде финансовых кризисов и великих депрессий — все подчиняются этим законам. Когда изменения окружающих условий доходят до некоторой критической точки, любая из этих систем достигает так называемого состояния бифуркации (в переводе с латинского — состояние раздвоения, или вилки). После этого достаточно ничтожного усилия, чтобы она скачкообразно перешла в иное состояние и продолжала функционировать уже в нем.

Однако в биоакустике нелинейности стали серьезно изучаться совсем недавно — в 1998 г. опубликовано первое базовое исследование, содержащее подробную классификацию вокальных нелинейностей, разработанную на основе вокализаций гиеновой собаки [1]. Для других млекопитающих ни встречаемость, ни функциональное значение нелинейных феноменов изучены не были. Мы же в то время исследовали вокальный репертуар красного волка и обнаружили, что у этого вида вокальные нелинейности распространены чрезвычайно широко. Оказалось также, что у красного волка нелинейности позволяют индивидуально определять животных по голосу, что проливало свет на возможный функциональный смысл этих явлений. Становилось понятно, что нелинейности, по-видимому, гораздо шире распространены у млекопитающих, чем это считалось раньше, и совсем не обязательно связаны с заболеваниями вокального аппарата или

какими-либо дисфункциями. Вполне логично было распространить исследование встречаемости и функционального значения нелинейностей и на другие виды млекопитающих, прежде всего на псовых.

В биоакустике к нелинейным явлениям относят субгармоники, бифонации (двухголосие), сайдебанды (в переводе с немецкого — дополнительные полосы) и голосовой шум. И оказалось, что все эти явления нелинейной динамики великолепно представлены в скулении самых обыкновенных домашних собак!

Конечно, строгий хозяин, который пользуется авторитетом у своей воспитанной собаки, никогда не позволит ей скулить по всякому поводу. Однако все имеет обратную сторону — если вы воспитываете собаку уж в очень большой строгости, то и услышать полный диапазон собачьих нелинейностей вам не придется. Нам, владельцам трех очаровательных такс, такая опасность не грозила, — мы получили «счастливую» возможность слушать их разнообразные скуления во время всех завтраков, обедов и ужинов и параллельно записывать их и анализировать. Кроме того, очень помогли наши друзья и коллеги, которые позволили записать также и голоса своих собак. И вот что удалось обнаружить в собачьих скулениях.

Во-первых, нормальные звуки без нелинейностей! В быденном языке благозвучие принято называть гармонией. В соответствии с этим и обычный, не содержащий никаких нелинейных явлений звук животного или человека тоже носит название гармонического. У собак, как и у большинства других млекопитающих, такие звуки производятся с помощью парных голосовых связок, которые колеблются с частотой несколько сотен или тысяч раз в секунду. Эта частота называется основной частотой звука и измеряется в герцах (Гц). Один герц ра-

вен одному колебанию голосовых связок в секунду. На построенном с помощью компьютера изображении звука — спектрограмме, показывающей зависимость частоты звука от времени, частота колебаний голосовых связок прорисована в виде самой нижней в стопке лежащих друг над другом полос. На рисунке, иллюстрирующем режим нормального голоса, показано гармоническое скуление таксы, у которой частота колебаний голосовых связок составляет 1 кГц (рис.1,*а*). Над основной частотой расположены другие полосы, которые называются гармониками и кратны основной частоте: первая гармоника имеет частоту вдвое выше основной, т.е. 2 кГц, вторая — 3 кГц, а третья — 4 кГц. При этом расстояние между двумя соседними гармониками все время остается равным величине основной частоты. Точно так же построены и гласные звуки у людей. К примеру, если вы сами произнесете в микрофон звук «а-а-а» и потом построите на компьютере его спектрограмму, то картинка будет очень похожей на гармоническое скуление собаки, разве что основная частота будет ниже — около 200 Гц у мужчин и около 300 Гц у женщин (рис.2,*а*)

Каким же образом голосовые связки производят звуки? Связки парные, и поэтому источников колебаний на самом деле два, но колеблются они синхронно. Это происходит потому, что при каждом цикле колебаний связки соприкасаются друг с другом. Но что же заставляет их регулярно соприкасаться? Во-первых, их эластичность, а во-вторых, так называемые силы Бернулли. Чтобы понять, как они работают, вспомним историю «Титаника». Говорили, что над этим кораблем с самого начала висел злой рок. Еще на выходе из бухты в свой первый (оказавшийся также и последним) рейс «Титаник» едва не столкнулся со швартующимся «Нью-Йорком» и лишь чудом из-

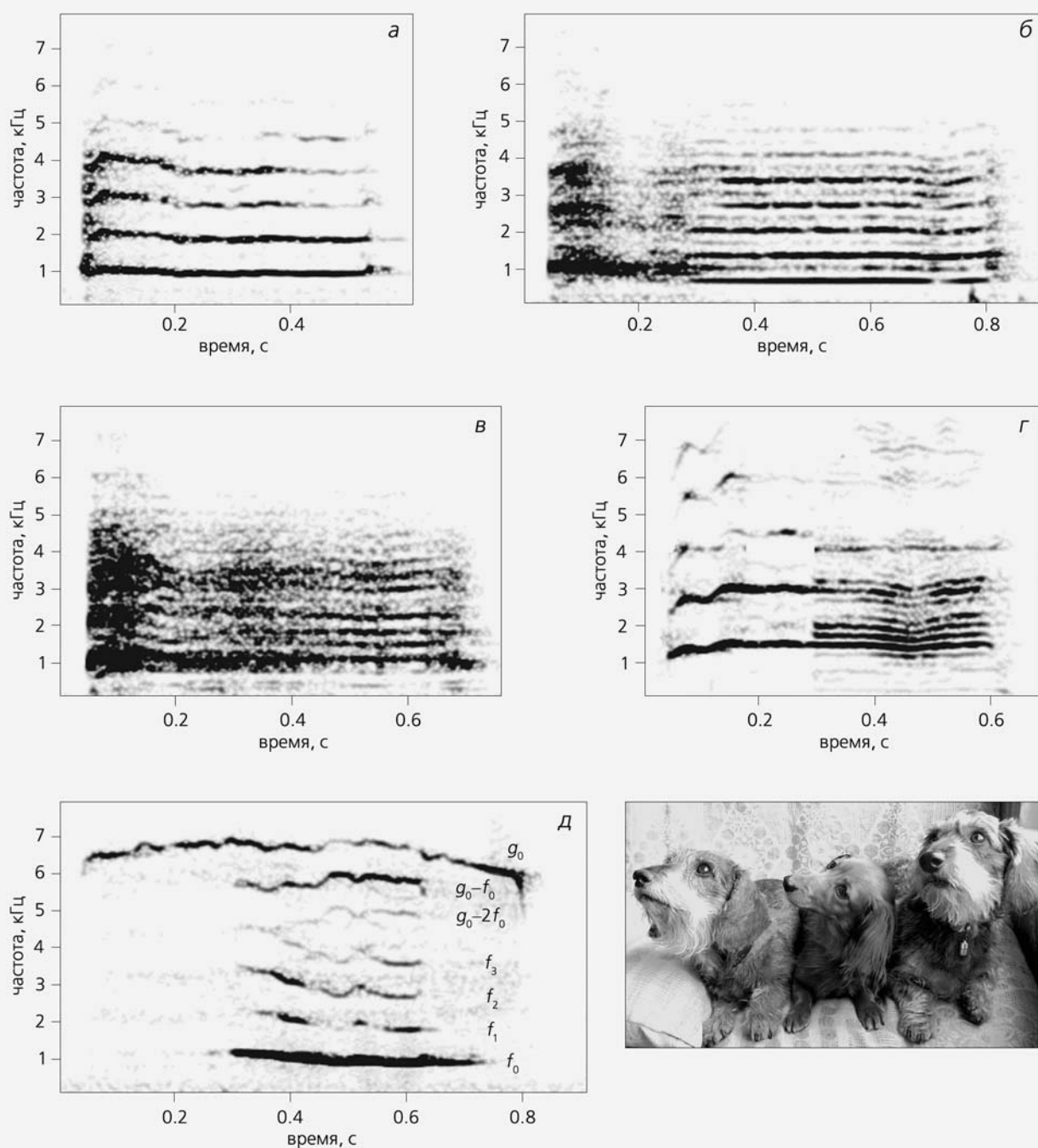


Рис.1. Спектрограммы скуления собак. а — тональное скуление без нелинейностей в спектре: нижняя полоса — это основная частота, равная частоте, с которой колеблются голосовые связки. Над ней лежат ее гармоники, значения которых кратны основной частоте. б — скуление с субгармониками — дополнительными полосами в $1/2$ величины основной частоты. в — скуление, содержащее голосовой шум, появляющийся в виде неравномерного зачернения. Гармонические полосы, проступающие в шуме, свидетельствуют о том, что шум производится именно в области голосовых связок, а не где-нибудь выше в вокальном тракте. г — сайдебанды заметны в виде полосок, расположенных вверх и вниз от основной частоты. Величина шага между этими полосками равна модулирующей частоте, образующей сайдебанды. д — бифонация в скулении. Видна нижняя основная частота f_0 с ее гармониками f_1 , f_2 и f_3 , и верхняя основная частота g_0 . Частоты f_0 и g_0 взаимодействуют, образуя комбинаторные частоты в результате сложения и вычитания обеих основных частот. В этом звуке видны комбинаторные частоты $g_0 - f_0$ и $g_0 - 2f_0$.

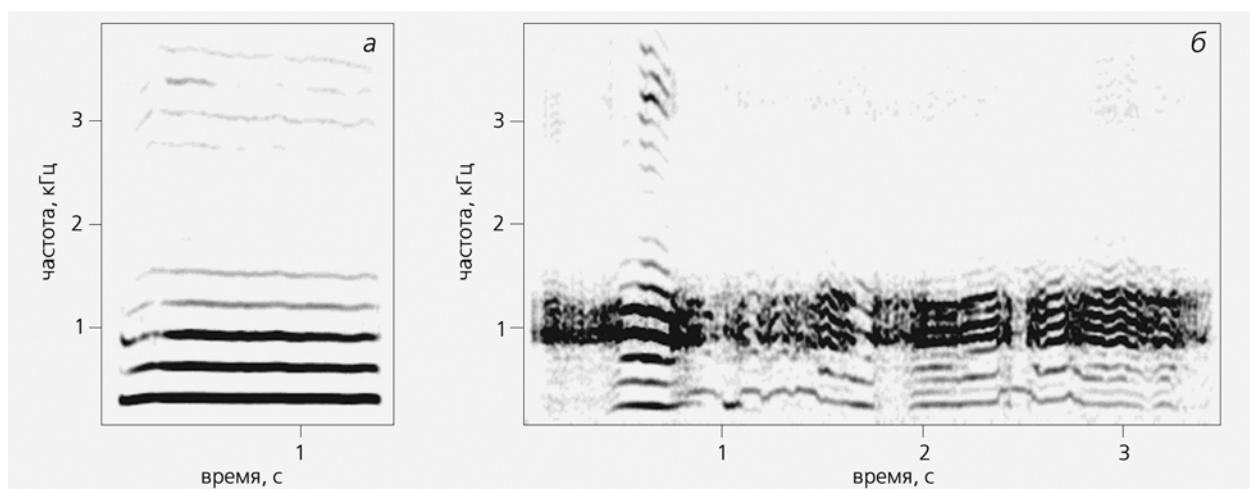


Рис.2. Спектрограммы голоса человека. а — гласный звук «а-а» здорового человека содержит только основную частоту и кратные ей гармоники. б — гласный звук «а-а» пациента с ларингитом начинается с голосового шума, затем на протяжении первой секунды включается участок нормального голоса, который опять переходит в шум. На третьей секунде включается субгармонический режим и появляются полосы в $1/2$ основной частоты.

бежал катастрофы. Что же случилось? Дело в том, что из-за быстрого движения «Титаника» под воздействием сил Бернулли суда неуклонно повлекло друг к другу. Только усиленная работа двух буксиров, вовремя оттянувших «Нью-Йорк», помогла спасти положение. Вы можете это проиллюстрировать для себя, если возьмете за верхние края два листа бумаги и, удерживая их на расстоянии около 5 см друг от друга, подуете между ними. Их нижние края притянутся друг к другу. Аналогично притягиваются друг к другу и голосовые связки, вибрирующие в потоке воздуха, поступающего из легких. За счет эластичности и жесткого закрепления с одной стороны связки не слипаются плотно, а лишь ненадолго соприкасаются при каждом цикле колебаний и затем вновь расходятся, вибрируя в результате с одинаковой частотой.

Если же давление потока воздуха будет нарастать, а связки неравномерно натягиваться, то в какой-то момент может случиться так, что они будут соприкасаться через раз. Тогда одна связка будет колебаться в два раза медленнее, чем другая,

и число колебаний одной будет соответствовать основной частоте, а второй — вдвое меньшей. При этом между гармониками появятся дополнительные полосы с интервалом в одну вторую основной частоты. Эти полосы называются субгармониками, а режим колебаний голосовых связок — субгармоническим (рис.1,б).

Теперь поговорим о голосовом шуме. В основе шума, который способны производить голосовые связки, лежит физическое явление с пугающим названием детерминированный хаос. Детерминированный — значит предопределенный. А какая определенность может быть в хаосе? Оказывается, может. Для городского жителя, регулярно перемещающегося в часы пик в метро, примером детерминированного хаоса может быть толпа, хлынувшая к эскалатору из подошедшего поезда. Можете ли вы описать с помощью каких бы то ни было уравнений, в какой точке этой толпы вы окажетесь в следующее мгновение? Однако поток подхватывает вас и несет в нужном направлении, делая движения всех людей в этом потоке предопределен-

ными, хотя и хаотическими. То же верно и в отношении голосового шума. При этом режиме колебания голосовых связок рассинхронизированы и хаотичны, но они продолжают взаимодействовать при каждом цикле движений, что заставляет их колебаться вокруг некой средней частоты, давая «размазанный» спектр (рис.1,в).

Сайдебанды возникают в тех случаях, когда на высокую основную частоту колебаний голосовых связок накладывается другая, гораздо более низкая, модулирующая частота. Это можно представить как большие медленные волны с мелкой быстрой рябью внутри каждой из них. На спектрограмме высокая частота прорисовывается как ей и положено, в виде основной частоты и ее гармоник, а низкая выглядит как идущие сверху и снизу от гармоник постепенно затухающие спектральные полосы, шаг между которыми равен модулирующей частоте (рис.1,г). Еще неясно, что вызывает такие медленноволновые колебания; к примеру, это могут быть черпаловидные хрящи (к которым одним концом непосредственно крепятся го-

лосовые связки), надгортанник (который не дает пище попасть в дыхательные пути) или парус — клапан между носовой и ротовой полостью.

В радиотехнике ситуация обратная: «полезный сигнал» — это не высокая несущая частота (к примеру, какая-нибудь 101 FM, на которую вы настраиваете свой радиоприемник), а низкая модулирующая, в роли которой выступает человеческий голос и музыка. Приемник срезает несущую частоту, оставляя лишь модулирующую, которую мы и слышим при прослушивании радиопрограмм.

Сайдебанды (как и другие нелинейности) могут встречаться в голосе регулярно и придавать ему особую тембральную окраску. Трудно не согласиться, что известный бард Владимир Высоцкий своей популярностью обязан не только прекрасным текстам песен и хорошей музыке. Немалую роль в феномене Высоцкого сыграл также и его голос. В этом сразу можно убедиться, услышав песни Высоцкого пусть даже в очень хорошем, но не в авторском исполнении. При этом попытки подражать голосу и исполнительской манере автора неизменно не имеют успеха.

Секрет обаяния голоса Высоцкого — в присущих ему нелинейностях. Раскрыть его оказалось очень непросто, и главной помехой в этом оказалась неразлучная спутница Высоцкого — гитара. Высоцкий никогда не исполнял речитативов и не тянул ноты, как это делают оперные певцы, и как мы ни пытались найти участки только с голосом, без гитары, ритмичные гитарные аккорды неизменно «замазывали» все участки песен, где явно были слышны нелинейности. Кроме этого, не годились также участки, где звучали согласные звуки, поскольку при произнесении согласных подключаются наши традиционные артикуляторы — зубы и язык, которые полностью маскируют сигнал источника — го-

лосовых связок. Нужны были протяжные слоги без музыки, к тому же акцентированные голосом. Мы просмотрели на компьютере множество записей, пока не выбрали несколько фрагментов из песен «Ну вот исчезла дрожь в руках» и «Баллада о любви», пригодных для спектрального анализа.

Оказалось, что особый колорит голоса создавался благодаря его природной способности к продукции двух частот, формирующих сайдебанды. Одна из этих частот — обычная частота колебаний голосовых связок, которая у мужчин, напомним, составляет около 200 Гц. Кроме основной частоты, при испол-

нении некоторых слогов, где требуется напряжение голоса, у Высоцкого появлялась и вторая частота около 65 Гц. В результате в спектре звука возникали сайдебанды, которые и создавали тот самый знаменитый эффект звучащего аккорда, которого нельзя достичь ни с помощью нарочитой хриплости голоса, ни его перегрузкой. Дело в том, что за хриплость в голосе ответствен голосовой шум, а у Высоцкого звук голоса совершенно чистый, но очень значительно модулирован по амплитуде, что на слух воспринимается как дрожание. На спектрограмме слова «всегда» хорошо заметны полосы сайде-

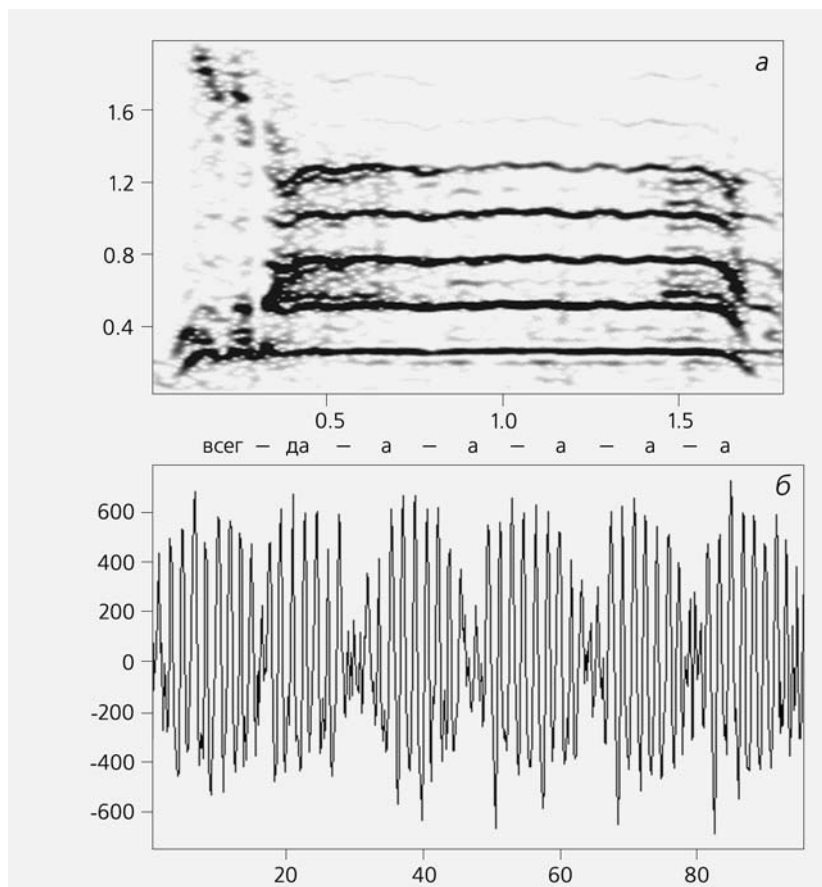


Рис.3. Голос Владимира Высоцкого. а — на спектрограмме слова «всегда-а-а» из песни «Ну вот исчезла дрожь в руках» хорошо заметны полосы сайдебандов над и под основной частотой и ее гармониками в начале и конце звука «а-а-а». б — осциллограмма конца фразы «Я поля-а-а» из песни «Баллада о любви» показывает, что основная частота голоса с периодом 1.5 мс сильно модулирована по амплитуде второй низкой частотой с периодом около 15 мс.

бандов в начале и конце звука «а-а-а» (рис.3).

Двухголосие, или бифонация, — это тоже одновременное появление двух разных частот в спектре. Строго говоря, в физическом смысле сайдебанды и бифонация — явления одного порядка, и различия между ними скорее количественные, а не качественные. Как правило, сайдебанды появляются, когда одна частота колебаний в голосе намного медленнее, чем вторая; к примеру, одна составляет десятки, а другая — сотни герц (как в голосе Высоцкого), а бифонация — когда и та, и другая частоты составляют сотни и тысячи герц.

Жесткошерстная такса Хильда обладала прямо-таки незаурядными способностями производить бифонации. На спектрограмме ее крика хорошо видна работа двух различных источников звука (рис.1,д). Самая нижняя частотная полоса соответствует основной частоте — частоте колебаний голосовых связок (900 Гц) и обозначена f_0 . Над ней располагаются кратные ей гармоники основной частоты. А выше них лежит не кратная основной частотная полоса, обозначенная g_0 , которая к тому же начинается раньше и заканчивается позже всех других. Этот звук явно произведен другим источником, а не голосовыми связками. Однако он независим от голосовых связок только до тех пор, пока звучит один. Как только включаются связки и до тех пор, пока их частота f_0 с ее гармониками и частота g_0 издаются одновременно, они взаимодействуют друг с другом, давая в результате комбинаторные частотные полосы, представляющие собой суммы и разности f_0 и g_0 ($g_0 - f_0$; $g_0 - 2f_0$; $g_0 + f_0$ и т.д.). Стоит ли говорить, что в поощрение за такие крики собаке доставались самые вкусные кусочки!

Что же это за второй источник, которым собаки (и другие псовые) пользуются для издавания бифонических звуков? Сейчас в различных научных пуб-

ликациях на его роль предлагаются самые разные кандидаты: к примеру, носовой тракт (тогда звук производился бы подобно ветру в трубе), пленочки-мембраны, имеющиеся на голосовых связках некоторых млекопитающих (мембрана дает высокую частоту, а мясистая толстая порция голосовой связки — основную частоту). Есть и еще более изощренные гипотезы, но пока ни одна из них не получила подтверждения. А поскольку обсуждение ничем не подтвержденных гипотез в науке называется спекуляцией, то оставим пока это малопочтенное занятие и лучше поговорим о двухголосых людях!

Эффект двухголосия может создаваться и тогда, когда каждая из голосовых связок вибрирует со своей собственной частотой, никак не синхронизируя свои движения со второй. Это происходит при заболеваниях голосового аппарата, вызывающих частичный паралич одной или обеих связок. У здоровых людей двухголосие встречается крайне редко — в литературе упоминается всего два случая «бифонических людей» [2]. Кроме этих случаев истинного двухголосия у людей существует также и ложное двухголосие — знаменитое искусство горлового пения народов Алтая, Саян, Башкирии и Тувы.

Чтобы понять это явление, необходимо представлять, чем отличается настоящий профессиональный, «оперный» певческий голос от пения человека без вокальных способностей. Такие данные были получены В.П.Морозовым, который выяснил, что настоящие мастера вокала, в отличие от непрофессионалов, подключают в помощь голосовым связкам маленький резонатор — расположенную над голосовыми связками так называемую вентрикулярную полость объемом всего в 4 см³ [3]. Как ни парадоксально, но способность заставить этот крошечный объем резонировать по времени пения позволяла голосу Шаляпина перекрывать оркестр и греметь, разносясь по огромным залам. Именно этот резонатор ответствен за резкое акцентирование частот в области так называемой певческой форманты — около 2.5–3 кГц. Певческому голосу можно научить, но, как правило, для этого необходимы природные задатки.

Но какое отношение все это имеет к двухголосию и к горловому пению? Ведь оно абсолютно не похоже на привычный нам вокал, хотя и имеет своих ценителей. Секрет двухголосого пения состоит в том, что никакого настоящего двухголосия в нем на самом деле нет! Основная частота с ее гармониками

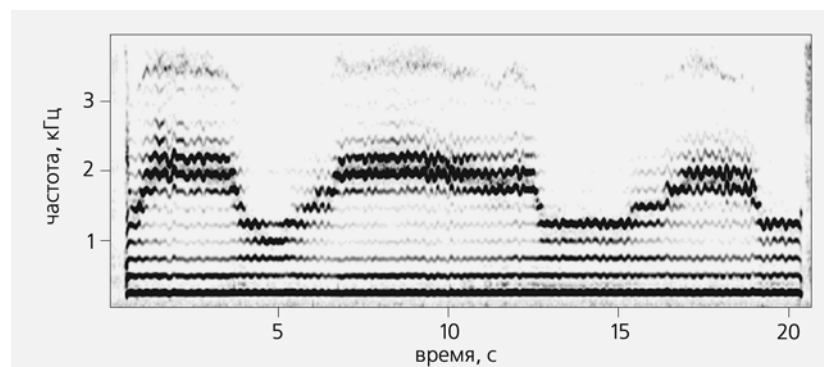


Рис.4. На спектрограмме фрагмента алтайского горлового пения (стиль узлау) хорошо видно, что в спектре звука присутствует всего одна частота с ее гармониками, но исполнитель за счет тонкого управления резонансами вокального тракта перераспределяет энергию в области верхних гармоник, что создает воображаемый эффект двухголосия.

все время сохраняется неизменной, и никаких свидетельств появления второго голоса (частотных полос, не кратных основной частоте) нигде не появляется (рис. 4). Откуда же слышится второй голос? А просто певческая форманта, которая по сути — усиленные, акустически акцентированные гармоники в частотной области около 2 кГц, начинает «жить своей жизнью», создавая иллюзию появления второго голоса. Получается, на слух мы воспринимаем основную частоту и ее усиленные резонансом гармоники как отдельные голоса. Более того, исполнители одного из стилей горлового пения — узлау — способны играть этой формантой как мячиком, перебрасывая усиленные участки частотного спектра то вверх, то вниз. По существу, исполнители двухголосого пения — это гениальные певцы, которые довели свое искусство до абсолюта. Если провести аналогии с изобразительным искусством, то двухголосие — это крайняя степень абстракционизма в пении, своего рода аналог «Черного квадрата» Малевича.

Теперь подведем итог всему сказанному и дадим краткую классификацию того, что представляют собой нелинейные вокальные феномены. Итак, голосовые связки млекопитающих — это система из двух сцепленных источников колебаний. В случае синхронизации колебаний в отношении 1:1 они производят гармонические звуки без нелинейностей, в ином кратном отношении (2:1, 3:1, 4:1) — субгармоники, при рассинхрони-

зированных колебаниях, сопровождающихся сцеплением связок, — голосовой шум, в отсутствие сцепления и независимости колебаний — бифонации.

А какую роль могут играть вокальные нелинейности у животных? Хотя с физической природой и структурой нелинейностей уже более-менее разобрались, об их функции известно очень мало. Однако первые исследования в этом направлении уже начали появляться, и, поскольку интерес к проблеме огромен, не за горами тот день, когда любопытные открытия начнут следовать одно за другим. Так что же известно уже сейчас?

Рассмотрим те случаи, когда нелинейности — это результат перегрузки вокального аппарата или результат заболевания (рис. 2,б). Собственно, животному, производящему такие крики, они никакой пользы не приносят, а вот неприятности доставить могут. Для индивидуумов другого пола это сигнал, что потенциальный супруг не вполне здоров и будет плохой опорой для воспитания потомства, а для хищников — указание на легкую добычу.

Но есть примеры и несомненной пользы нелинейностей для издающего их животного. По нашим наблюдениям, для назойливого птенца белого журавля стерха — это прекрасный способ бесконечно терроризировать своих родителей, требуя, чтобы его кормили, охраняли и ни на минуту не забывали о его существовании. Действительно, как можно забыть о существе, которое постоянно издает громкие

крики, к которым невозможно привыкнуть, потому что они все время разные из-за включения всевозможных нелинейностей! К подобному способу воздействия на родителей прибегают также человеческие и обезьяньи детеныши. Этого же эффекта достигают и собаки, используя бифонации, субгармоники и шум в скулениях как способ обратить на себя внимание хозяев.

По данным П.Миллера, киты-косатки, настоящие специалисты в производстве бифонических звуков, могут использовать их для того, чтобы определять направление движения членов своей стаи [4]. Высокие и низкие частоты распространяются по-разному — низкие более-менее одинаково во все стороны, а высокие — пучком. Анализируя разницу в интенсивности высокой и низкой частоты звука, косатки могут определить, к ним или от них движется кричащее животное. Немецкий ученый Г.Петерс с коллегами показали, что пятнистые гиены с помощью субгармоник узнают друг друга по голосу [5]. Включая и выключая субгармонический режим во время ухающих криков, гиены придают голосу индивидуальность, что немаловажно для координации действий во время ночных рейдов в поисках пищи.

Не так уж много известно, скажете вы? Но ведь и о самих нелинейных феноменах в голосах мы узнали всего несколько лет назад. Конечно, надо искать дальше, и здесь как никогда актуальны слова из песни Высоцкого: «Нам тайны нераскрытые раскрыть пора»! ■

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект 03-04-48919.

Литература

1. Wilden I., Herzel H., Peters G. et al. // Bioacoustics. 1998. V.9. P.171—196.
2. Herzel H., Reuter R. Biphonations in voice signals // Nonlinear, Chaotic and Advanced Signal Processing Methods for Engineers and Scientists / Ed. R.A.Kats. Woodbury, 1996. P.644—657.
3. Морозов В.П. Биофизические основы вокальной речи. Л., 1977.
4. Miller P.J.O. // Behavioral Ecology and Sociobiology. 2002. V.52. P.262—270.
5. Peters G., East M.L., Herzel H. et al. // Bioacoustics. 2004. V.14. P.99—109.