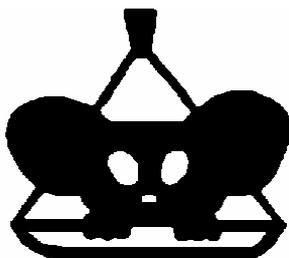


ЕВРО-АЗИАТСКАЯ РЕГИОНАЛЬНАЯ АССОЦИАЦИЯ ЗООПАРКОВ И
АКВАРИУМОВ

ПРАВИТЕЛЬСТВО МОСКВЫ



МОСКОВСКИЙ
ЗООЛОГИЧЕСКИЙ
ПАРК

Научные исследования в зоологических парках

Выпуск 9

Москва

1997

Как изучать звуковое поведение животных в зоопарках: практические рекомендации.

И. А. Володин, Е. В. Володина

Московский зоопарк

ВВЕДЕНИЕ.

При повседневном общении с животными в зоопарке мы наблюдаем многочисленные формы поведения: движения, крики, различные социальные взаимодействия, сон и т. д. Практическая польза изучения поведения животных в неволе очевидна - это источник важнейшей информации о намерениях, состоянии здоровья, физиологическом состоянии, способности к размножению, состоянии психики животного. До сих пор наиболее разработанными с научной точки зрения и поэтому наиболее широко используемыми в практике содержания и разведения животных были поведенческие подходы, основанные на анализе двигательного поведения (например, Попов, Вахрушева, 1993). Акустическое поведение животных изучено в меньшей степени, однако, с точки зрения получения сведений о животных, оно не менее информативно, чем двигательное поведение. Информация, полученная на основе двигательного поведения, и та, которую можно почерпнуть в результате анализа криков, может касаться как одних и тех же, так и разных аспектов состояния животных. Эти разные подходы к анализу поведения животных дополняют и обогащают друг друга. Примером комплексного применения различных подходов может служить программа Американской Ассоциации Зоологических Парков и Аквариумов по сохранению гепарда (Grisham, 1989; Grisham, Lindburg, 1989).

Возможности применения биоакустических методов при содержании и разведении животных весьма широки. В настоящее время диапазон применения биоакустических методов включает идентификацию вида или подвида по голосовым реакциям, оценку репродуктивного состояния,

определение пола у мономорфных видов птиц, акустическую стимуляцию брачного поведения и размножения, оценку текущего эмоционального состояния и социального статуса животных и другие чрезвычайно актуальные для зоопарков практические задачи. Кроме того, зоопарк часто выступает как база для проведения фундаментальных биоакустических исследований, таких как описание вокальных репертуаров редких видов животных, изучение географической изменчивости криков, исследование таксономического родства между видами на основании структуры вокализаций, исследование коммуникативного поведения, изучение индивидуальной специфичности криков, анализ связей между структурой вокализаций и характеристиками внутреннего состояния животных (Володина, Володин, 1995).

В связи с этим, в последнее время значительное число исследовательских и учебных работ, проводимых в зоопарках, связано со сбором и анализом акустического материала. В ближайшем будущем можно ожидать резкого увеличения доли подобных исследований. Однако, изучение вокального поведения животных требует знания определенных технических приемов проведения записи звуков животных и умения обращаться со специальной звукозаписывающей и звукоанализирующей аппаратурой.

К сожалению, на сегодняшний день на русском языке не существует ни одного пособия по практическим приемам записи и анализа акустических сигналов животных. Из-за отсутствия такой информации, область биоакустических исследований неоправданно представляется слишком узкоспециализированной и недоступной широкому кругу исследователей без профессиональной подготовки. Эта статья поможет исследователям, сотрудникам зоопарков, студентам и натуралистам, начинающим работать со звуками животных, разобраться в этой проблеме.

В настоящей статье мы не будем специально останавливаться на таких вопросах, как физическая структура звуковых колебаний и акустические свойства среды, устройство звукозаписывающей и

звукоанализирующей аппаратуры, строение и функционирование голосового и слухового аппаратов и методы изучения эхолокации у животных. Все эти вопросы достаточно подробно освещены как в научной, так и популярной литературе (Биоакустика, 1975; Курсков, 1978; Богословская, Солнцева, 1979; Сергеев, 1980; Згут, 1982; Мариковский, 1983; Морозов, 1987; и др.). Общие принципы планирования и проведения этологических наблюдений за животными в неволе, обработки и представления результатов подробно изложены в методической разработке Попова и Ильченко (1990). Основная цель настоящих рекомендаций - описать практические подходы, применяемые на каждом этапе проведения биоакустического исследования в условиях неволи, начиная от сбора материала и до классификации вокализаций. В краткой вводной части мы сопоставим вокальное поведение млекопитающих и человека.

Эта статья будет полезна специалистам, которые применяют биоакустические подходы наряду с другими биотехническими приемами, широко используемыми при содержании и разведении животных; а также тем, кто собирается заниматься дальнейшей разработкой биоакустических методов в зоопарках. Кроме того, это практическое пособие могут использовать руководители студенческих практик и юннатских кружков и все, кто собирается вести биоакустические исследования.

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ВОКАЛЬНОМ ПОВЕДЕНИИ МЛЕКОПИТАЮЩИХ.

Сходство и различие вокального поведения человека и млекопитающих.

Вокальное поведение млекопитающих соответствует той части вокального поведения человека, которая называется невербальным, или неречевым, вокальным поведением. У человека невербальные вокализации включают, к примеру, смех, плач, стоны, вздохи и крики боли. У животных все вокализации - невербальные. За все вокализации млекопитающих и только за невербальные вокализации человека отвечают одни и те же три группы подкорковых структур головного мозга. За речь человека отвечают речевые центры коры полушарий

головного мозга. У млекопитающих ничего подобного речевым центрам человека в коре полушарий головного мозга нет, стало быть нет и звуков, соответствующих речевым звукам человека.

Чем определяется структура звуков млекопитающих и человека и их многообразие.

Структура звуков млекопитающих определяется строением их вокального тракта. Модель вокального тракта млекопитающих можно представить в виде слепо замкнутой с одного конца трубки. На слепом конце трубки располагаются голосовые связки; открытый конец представляет собой ротовую полость. Воздух с усилием продувается через щель между натянутыми голосовыми связками (тоненькими мышцами), которые при этом начинают вибрировать, и затем отражается от стенок ротовой и носовой полостей. Этот механизм может усложняться вибрацией, обеспечиваемой мышцами, не участвующими в продукции звука. Иногда голосовые связки не вибрируют и звук получается при прохождении воздушной струи через сужения вокального тракта.

Структура невербальных вокализаций человека определяется теми же процессами, что и структура криков животных. Однако при продукции звуков речи гораздо большую роль, чем у животных, играет артикуляция (движения рта), в которой участвуют язык, небо, зубы и губы.

В каких ситуациях млекопитающие обычно кричат.

Крики млекопитающих сопровождают брачное поведение, поведение заботы о потомстве, агонистическое (агрессивное и защитное), а также комфортное поведение. Помимо этого, животное может кричать от боли и неудовлетворенного желания (состояние фрустрации). Все это - так называемые вокализации вторичной вокальной системы. Общее у этих вокализаций то, что каждая из них связана с каким-либо из целой гаммы оттенков внутреннего состояния, испытываемого животным в момент крика. Они управляются из задних отделов лимбической системы головного мозга. Подавляющее большинство криков, издаваемых млекопитающими, относится к этой группе.

Намного менее распространены в вокальных репертуарах млекопитающих вокализации, не связанные с испытываемым в момент

крика внутренним состоянием. Это - так называемые вокализации первичной вокальной системы. Эти вокализации управляются из переднего отдела лимбической системы мозга. Только звуковые реакции, относящиеся к первичной вокальной системе, можно закрепить с помощью подкрепления в качестве ответа на условный стимул (Jurgens, 1988).

Так, собаку можно довольно легко приучить лаять в ответ на включение лампочки за пищевое подкрепление, но невозможно приучить кошку мурлыкать в ответ на включение лампочки, если при этом она не испытывает комфортного состояния. Лай у собак имеет двойное представительство - и в первичной, и во вторичной вокальных системах, а мурлыканье кошек - только во вторичной. Лай, представленный в первичной вокальной системе, может быть закреплен в качестве вокального ответа на команду, и он не будет связан с испытываемым собакой в момент лая внутренним состоянием.

Как возникли вокализации млекопитающих и какую информацию они передают.

Звуки млекопитающих возникли как побочный эффект дыхания в результате прохождения воздуха через дыхательный тракт и первоначально “не означали” ровным счетом ничего и не выполняли никакой определенной “функции”. Они возникали просто потому, что животное дышало. Когда животное испытывало разные эмоции, его дыхание в соответствии с ними менялось различным образом, а вместе с дыханием менялись и издаваемые звуки.

Кричащее животное не стремится передать информацию о своем состоянии, но тот, кто слышит крик, способен ее расшифровать. Те животные, которые могли делать это лучше других и использовать скрытую в криках информацию, получали эволюционное преимущество. Таким образом, в криках животных отражается их внутреннее состояние и по структуре вокализаций можно судить о его изменениях. Кроме того, в процессе эволюции некоторые вокализации приобрели узко специальную

функцию для передачи определенных сообщений, например, сигнал предупреждения об опасности у грызунов.

СБОР МАТЕРИАЛА.

Оборудование для записи звуков.

После того, как Вы определились, с какой целью и с каким видом (видами) животных Вы будете проводить исследование, можно приступать к сбору материала. Оборудование, необходимое для записи сигналов животных, включает в себя переносной ленточный или кассетный магнитофон и микрофон. Ниже перечислены требования к аппаратуре, которые обычно достаточны для решения широкого круга задач.

Основные требования к магнитофону - широкий рабочий диапазон частот, т.е. тот диапазон частот, в пределах которого запись и воспроизведение звуков производятся без искажений, а также возможность ручной регулировки уровня записи. Рабочий диапазон частот должен быть не менее 40 - 16000 Гц, и во всех случаях должен превышать максимально возможные частоты записываемых звуков. Совершенно недопустимо использование при записи автоматической регулировки уровня (АРУЗ), поскольку в этом случае магнитофон самостоятельно подстраивается под самые громкие звуки (которые часто являются шумовыми), сглаживает различия между отдельными частями сигнала, и выравнивает по интенсивности всю запись. Чем выше скорость лентопротяжки - тем выше качество, поэтому при записи звуков животных она должна быть не менее 4,76 см/с для кассетного и 9,5 см/с для катушечного магнитофонов. Немаловажной деталью является и чисто механическая надежность переключателей на панели управления и лентопротяжного механизма магнитофона, способных выдержать постоянную смену режимов работы. Поэтому оптимальным является использование профессиональной переносной звукозаписывающей аппаратуры, конструкция которой рассчитана на повышенные нагрузки, такой как пленочные "Репортер-5п", "Репортер-ритм", "Uher-4200", "Uher-4400-стерео" и кассетные "Sony-WM-D6C", "Sony-TC-D5M professional".

При работе в помещении достаточно удовлетворительное качество записи обеспечивают бытовые магнитофоны с высокими рабочими частотными характеристиками.

Микрофоны по своему устройству подразделяются на динамические и конденсаторные. Первые более просты конструктивно, и потому дешевле и надежнее в работе; вторые, как правило, имеют более высокие частотные характеристики. Верхняя граница номинального диапазона частот используемого микрофона (т.е. частотного диапазона, в пределах которого микрофон минимально искажает записываемые звуки) должна быть не ниже 15 кГц. Желательно применять высокочувствительные микрофоны, “улавливающие” даже относительно тихие звуки (чувствительность на частоте 1 кГц не менее 4-5 мВ/Па), хотя для записи с близкого расстояния возможно использование микрофонов с чувствительностью 1.5 мВ/Па. Направленность микрофона также оказывает существенное влияние на качество записи, однако цена узконаправленных микрофонов очень высока (до 1000 \$), что сильно ограничивает их применение. Всем перечисленным выше особенностям удовлетворяют относительно недорогие отечественные микрофоны МД-82 (динамический) и МКЭ-100 (конденсаторный).

Для получения записей высокого качества необходимо использовать наиболее качественные типы магнитных лент и кассет. Это особенно важно, если собранный материал предназначен для длительного хранения и использования.

Проведение записи.

Во всех случаях перед началом работы необходимо подобрать режим записи, включающий выбор расстояния до животного, уровня записи и места расположения оператора. Сделанная пробная запись тут же прослушивается для контроля имеющихся помех, поскольку микрофон, в отличие от человеческого уха, не выделяет избирательно значимые звуки из акустического фона и одинаково хорошо записывает как полезные сигналы, так и шумы. При значительных различиях в интенсивности

записываемых звуков, режимы для тихих и громких сигналов подбираются отдельно.

Перед началом записи на магнитную ленту надиктовывается место, дата и время начала записи. Во время записи исследователь отслеживает поведение животного, и по необходимости комментирует его на магнитную ленту, стараясь говорить в промежутках между криками (удобно также использовать стереофонические магнитофоны, где на один канал производится запись криков животного, а на другой - запись комментария). Комментарий также должен включать сведения о всех переменах режима записи (уровня, расстояния до животного, его ориентации по отношению к микрофону, местоположения наблюдателя). В случае, когда кричат одновременно несколько животных или запись очень зашумлена, следует каждый значимый крик маркировать голосом (к примеру, при переключке двух животных, словами "первый, второй, первый, первый, второй..." и т.д.). Если комментарий по ходу записи невозможен, тогда его делают сразу после ее окончания.

Предпочтительно вести запись большими блоками, как можно реже включая и выключая магнитофон. Лучше включить магнитофон заранее, чем, экономя ленту, пытаться подловить начало сигнала. В последнем случае вы почти наверняка пропустите первые 2-3 с крика животного и запись придется выбраковать.

Та же участь постигнет звуки, записанные с превышением уровня записи (когда индикатор уровня показывает значения, большие 0 дБ), поскольку энергетические характеристики записанных звуков будут безнадежно искажены. Если необходимо качественно записать серии, состоящие из звуков, сильно различающихся по громкости, надо последовательно сделать две записи. Сначала придется пожертвовать тихими звуками, записав громкие с низким уровнем записи, а затем - громкими, записав тихие с высоким уровнем записи. В первом случае тихих звуков будет не слышно совсем, а во втором - тихие будут записаны нормально, а громкие - с искажениями.

Некоторые искажения сигналов при записи неизбежны, однако надо стремиться свести их к минимуму. Поскольку микрофон прекрасно записывает даже очень слабые механические колебания, для исключения помех надо избегать прикосновений микрофона к любым предметам (решеткам, веткам, траве). Пальцы, держащие микрофон, должны быть неподвижны. Микрофонный шнур не должен волочиться по земле и задевать за всякие предметы. Даже при записи сигналов в помещении необходимо пользоваться ветрозащитой (специальной поролоновой насадкой, которой комплектуется любой качественный микрофон). В ветреную погоду без крайней нужды на открытом воздухе запись лучше не производить (искажения неизбежны), если же это необходимо, микрофон следует закрывать от порывов ветра хотя бы собственным телом. Запись в помещении дает искажение структуры звуков (особенно их длительности) за счет возникновения эха при отражении от стен помещения, поэтому проведение записей в открытых вольерах предпочтительнее.

Батарейки надо хранить отдельно от магнитофона и конденсаторного микрофона и вставлять непосредственно перед работой. Это позволит избежать порчи аппаратуры при вытекании электролита из выработавших свой ресурс батареек. Для записи нельзя пользоваться подсевшими батарейками, так как при этом уменьшается скорость лентопротяжки, и записанные звуки искажаются. При проведении записи при минусовых температурах батарейки могут разряжаться очень быстро; в таких случаях следует ограничивать время звукозаписи или пользоваться выносным блоком питания, который можно держать за пазухой. Единственный способ спасти особо ценную запись, сделанную на разрядившихся батарейках - это немедленно перезаписать ее с портативного магнитофона с использованием того же комплекта батарей (что более или менее нивелирует искажения) на другой магнитофон с нормальной скоростью лентопротяжки.

И последнее. Отправляясь записывать крики, всегда берите с собой запасной комплект свежих батарей и дополнительную кассету или

катушку с лентой. Всегда существует вероятность, что в самый интересный момент порвется или кончится пленка, подведут батарейки, хорошо знакомое животное вдруг начнет издавать совершенно новые звуки или просто произойдет что-то необычное.

Монтаж и хранение записей.

После того, как крики записаны, необходимо подготовить их к хранению и последующей обработке. Подробные данные о режиме и условиях записи со всеми примечаниями заносят в специальный дневник сбора материала в тот же день, когда она произведена. Полный паспорт записи включает следующие сведения: номер катушки или кассеты, на которой будет храниться запись; порядковый номер записи на катушке или кассете; дату и время записи; вид животного; особь, ее пол, возраст, может быть, кличка; характер звуков и ситуация, в которой они издавались; уровень записи и расстояние до животного; место записи (в каком зоопарке и в каком месте зоопарка она сделана, на улице или в помещении); погода; имя автора записи.

Обычно записи криков животных нуждаются в предварительном монтаже, поскольку содержат длительные промежутки без криков, сильно зашумленные крики, не отличимые от фона, звуки, записанные с “перегрузкой” и т.п. Если записи сделаны на ленточном магнитофоне, такие куски ленты нетрудно вырезать, вновь склеивая запись с помощью специального скотча. Однако, если в дальнейшем предполагается измерять интервалы между криками, монтаж записи не проводят.

Из подготовленных таким образом записей формируется фонотека. Ниже мы, в качестве одной из возможных, приведем схему хранения массива записей криков животных в фонотеке Московского зоопарка. Применяемый нами способ позволяет достаточно легко ориентироваться в массиве записей, сделанных от более 100 видов животных в разных ситуациях в течение ряда лет.

Мы пользуемся ленточными магнитофонами. Записи вокализаций каждого вида животных накапливаются на отдельных катушках. Начало каждой катушки маркируется ракордной лентой зеленого или синего

цвета (обычный стандарт маркировки начала), на которой записывается номер катушки. Сделанные записи одна за другой под соответствующими порядковыми номерами подклеиваются последовательно, разделяясь кусками ракордной ленты белого или желтого цвета, таким образом, что зеленый ракорд, маркирующий начало катушки, оказывается внутри. После того как катушка заполнена, конец последней записи маркируется ракордом красного цвета, на котором также ставится номер катушки. Каждая катушка для защиты от пыли и высыхания упаковывается в полиэтиленовый пакет и затем в коробку. Коробки с записями хранятся в вертикальном положении вдали от отопительных приборов и источников магнитного поля. Раз в год все магнитные записи фонотеки следует перематывать на магнитофоне для снятия магнитных напряжений, возникающих между витками ленты.

На каждый вид животного в каталоге фонотеки заводится карточка, на которой дублируются паспортные данные записей криков.

При использовании кассетного магнитофона монтаж записей путем разрезания и склеивания кусков ленты невозможен. В этом случае можно использовать перезапись части акустических сигналов на другой магнитофон, рабочий диапазон частот которого не ниже того, который применялся для сбора материала. Возможно также детально описывать расположение сигналов на кассете или катушке, используя счетчик метража пленки. Однако, поскольку показания счетчиков на разных магнитофонах обычно различаются, сделав такую разметку, Вы будете вынуждены пользоваться только тем магнитофоном, на котором она была произведена.

ПРИБОРНАЯ ОБРАБОТКА ЗАПИСЕЙ ВОКАЛИЗАЦИИ.

Приборы для анализа вокализаций.

В отличие от двигательного поведения, где различия между отдельными демонстрациями оцениваются “на глаз” и анализ структуры двигательных демонстраций очень трудоемок (Golani, 1976; 1992), методы структурного анализа звуков уже давно разработаны и широко применяются в биоакустических исследованиях. Применение этих

методов существенно повышает разрешающую способность, объективность, и точность исследований. Поскольку звуковые колебания представляют собой волновой процесс, их физические характеристики можно измерять и описывать. Традиционно применяющиеся приборы, позволяющие получить “портреты” звуков - это осциллограф и спектрограф. Недавно было разработано программное обеспечение для спектрографического анализа звуков на компьютере (так называемый компьютерный сонограф), позволяющее существенно повысить эффективность работы.

Из всех имеющихся на настоящий момент приборов для анализа звуков компьютерный сонограф наиболее удобен. Он предоставляет много вариантов режимов для обработки звуковых сигналов, работает с “электронной версией” записи, сохраняя ее в виде файла и не требуя повторного проигрывания сигнала для обработки в другом режиме. Компьютерный сонограф позволяет манипулировать сигналом, представляя любые из его характеристик в наиболее удобной для анализа форме. Он позволяет также отфильтровывать самые громкие частотные составляющие сигнала и убирать шумы, не совпадающие по частоте с анализируемым сигналом. С помощью специального курсора можно с высокой точностью измерять частотно-временные и амплитудные характеристики сигнала в любой его точке. Режим “реального времени” позволяет просматривать спектрограмму сигнала на экране дисплея одновременно с проигрыванием ее на магнитофоне.

Изображения звуков, получаемые с помощью приборов. Осциллограммы и спектрограммы.

С помощью приборов могут быть получены изображения звуков в виде осциллограмм и спектрограмм, которые затем можно сравнивать друг с другом и описывать с использованием объективных параметров времени, частоты и амплитуды. Во всех применяющихся в настоящее время способах приборного анализа звука частотные и временные параметры связаны обратно пропорциональным соотношением ($f=1/\Delta t$).

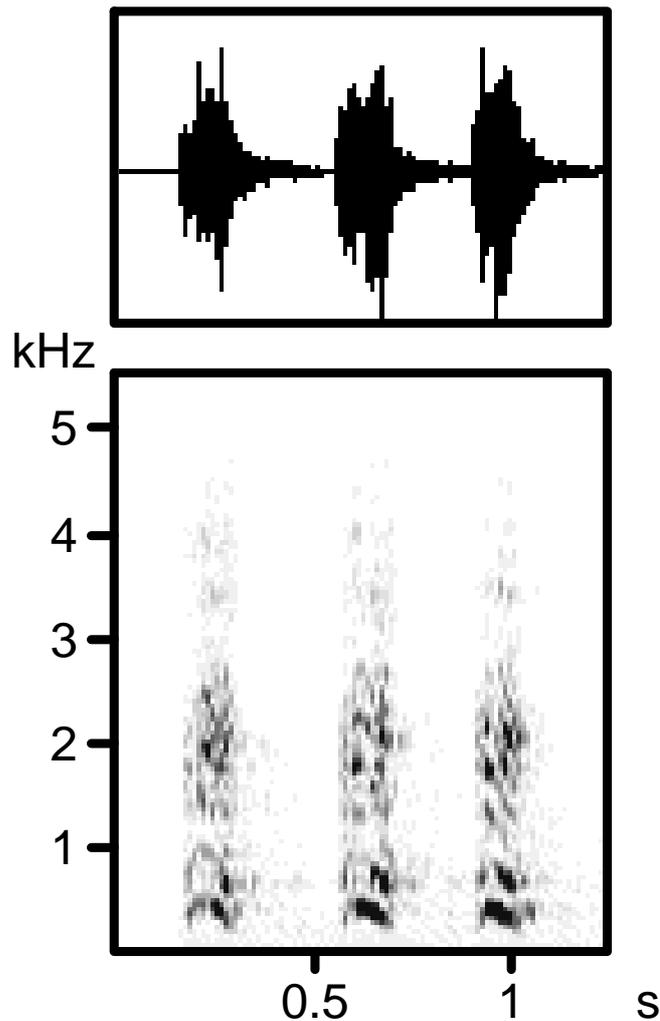


Рис. 1. Осциллограмма (вверху) и спектрограмма (внизу) трех криков шиншиллы при беспокойстве. Анализируемый частотный диапазон - 5,5 кГц (ось ординат); длительность анализируемого временного окна - 1,25 с (ось абсцисс).

На рисунке 1 представлены одна над другой осциллограмма (вверху) и спектрограмма (внизу) трех криков шиншиллы (*Chinchilla laniger*) при беспокойстве, выполненные с помощью компьютерного сонографа. Осциллограмма представляет собой развертку изменений амплитуды колебаний звуковой волны во времени. Поскольку осциллограмма - это непосредственное графическое изображение волнового процесса, амплитудные колебания направлены в обе стороны от оси времени (оси абсцисс). Чем тише звук, тем ниже амплитуда звуковых колебаний и тем ближе она к нулевой отметке; чем громче звуковой сигнал, тем больше

высота амплитудных пиков в обе стороны от нулевой оси. Осциллограмма позволяет очень точно измерять длительности звуковых посылок и интервалы между ними, а также оценивать относительную громкость разных участков звукового сигнала.

Спектрограмма представляет собой развертку частоты звукового сигнала во времени и используется для анализа частотного спектра вокализаций (рис. 1). По оси абсцисс на рисунке отложено время, по оси ординат - частота. Если в сигнале присутствуют звуковые колебания определенной частоты, то на сонограмме они изображаются в виде зачерненных участков. Причем чем выше относительная громкость данного частотного участка (т.е., чем выше его энергия, выражающаяся в величине амплитуды звуковых колебаний), тем интенсивней его зачернение.

Компьютерный сонограф имеет также режим построения суммарного энергетического спектра сигнала (рис. 2), который позволяет выявлять доминантный частотный диапазон всего сигнала в целом. Кроме того, компьютерный сонограф располагает режимом для получения моментальных срезов значений амплитуды в сигнале в любой заданный момент времени (рис. 3), что позволяет оценивать перераспределение энергии между частотами на протяжении сигнала.

Подготовка записей к обработке.

Записи можно промаркировать голосом или (для записей, сделанных на пленке) - с помощью вклеивания до и после нужной звуковой последовательности участков цветного ракорда; основная задача такой маркировки - легко найти нужный звук в массиве записей.

Компьютерный сонограф позволяет вводить за один прием участки записи длительностью от нескольких секунд до десятков и сотен секунд, в зависимости от выбранной исследователем величины анализируемого временного окна. В результате анализа, осциллограммы и спектрограммы звуков высвечиваются на экране дисплея. Полученные изображения можно анализировать прямо с дисплея, или же распечатывать с помощью принтера. Для того, чтобы не перепутать графические изображения

разных звуков, на бумажных распечатках сразу пишут их порядковые номера.

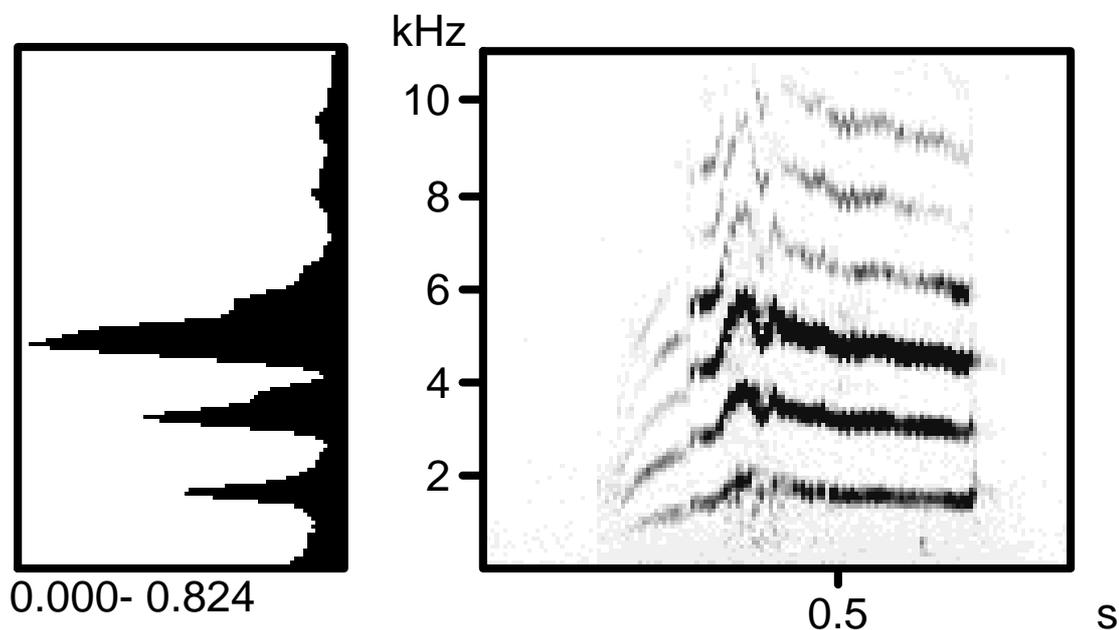
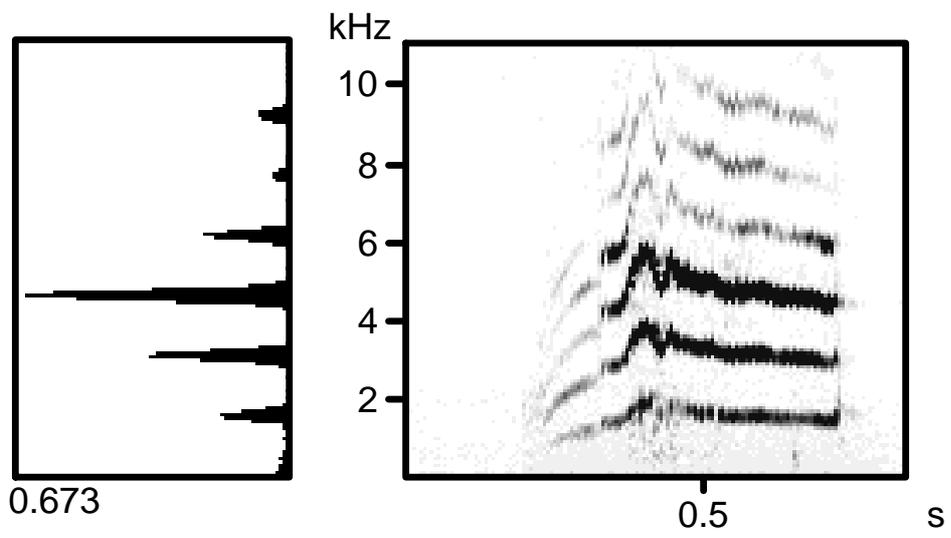
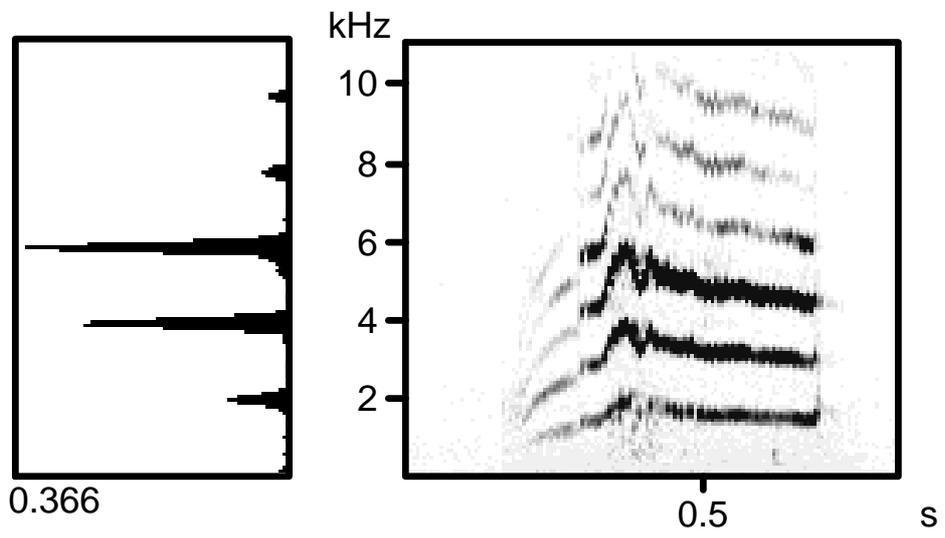
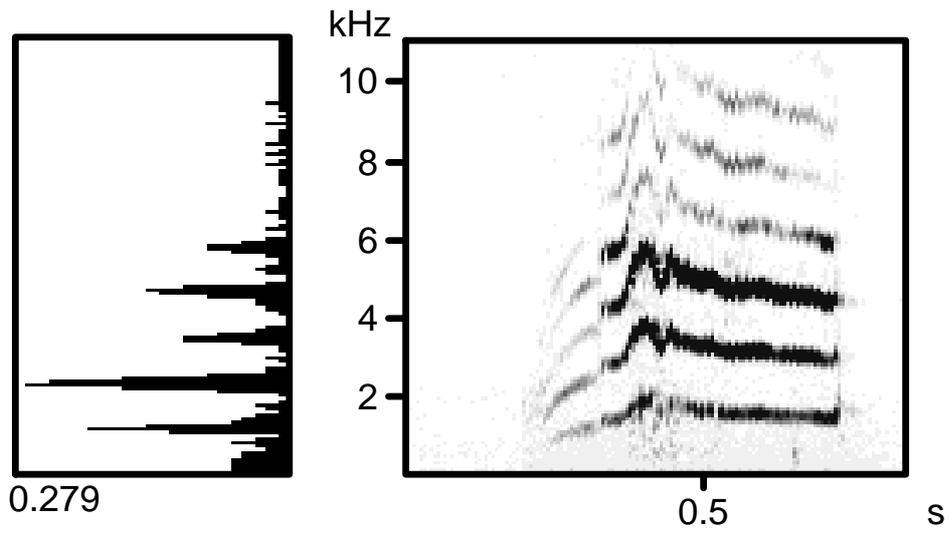


Рис. 2. Частотно-модулированный писк тушканчика-прыгуна (*Allactaga sibirica*) при беспокойстве со стороны человека. Слева от спектрограммы - распределение энергии в зависимости от частоты суммарно во всем анализируемом частотно-временном окне. Градация интенсивности разных частей сигнала приведена относительно участка максимальной громкости. Видно, что частоте максимальной энергии сигнала соответствует область частот около 5000 Гц; второй пик интенсивности приходится на частотную область 3400 - 3600 Гц.

Рис. 3. Частотно-модулированный писк тушканчика-прыгуна при беспокойстве со стороны человека. Распределение энергии в зависимости от частоты: моментальные энергетические срезы в точках спектрограммы, удаленных на 0,279 с, 0,366 с и 0,673 с от начала частотно-временного окна. Перемещая курсор, можно оценивать перераспределение энергии между частотами на протяжении сигнала.



СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ АКУСТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА.

Структурные типы звуков.

Звуки, производимые животными, делятся на инструментальные (к примеру, стук дятла о дерево) и звуки, издаваемые при помощи вокального тракта. Среди последних можно выделить три основных структурных типа, различающихся способами звукопродукции: тональные звуки, звуки в виде серии импульсов и шумовые.

Тональные звуки издаются только на выдохе в результате аэродинамически вызываемых колебаний голосовых связок и последующего прохождения звуковых волн через резонатор, в качестве которого выступает вокальный тракт: глотка, ротовая полость и носовая полость. Такой механизм носит название фонации.

Механизм звукопродукции звуков в виде серии импульсов может включать фонацию наряду с вибрацией дыхательной мускулатуры (диафрагмы, межреберных мышц) (Frazer Sissom et al., 1991). При продукции некоторых звуков в виде серии импульсов фонация отсутствует и задействована только вибрация (как в урчании кошек). В отличие от фонации, вибрация, обеспечиваемая дыхательной мускулатурой, может осуществляться в течение обеих фаз дыхательного цикла - и вдоха, и выдоха.

Шумовые звуки генерируются воздушной струей при прохождении через сужения вокального тракта. Голосовые связки в продукции этих звуков не участвуют. В некоторых случаях шумовой спектр в голосовых сигналах возникает при издавании очень интенсивных тональных или ритмичных импульсных вокализаций в результате рассинхронизации движений голосовых связок.

Кроме трех “чистых” структурных типов часто встречаются вокализации смешанной структуры, в которых задействованы одновременно несколько механизмов звукопродукции. Такие вокализации можно назвать промежуточными. Кроме того, встречаются формы, где в пределах одной вокализации один структурный тип сменяет другой - такие вокализации можно назвать переходными.

Параметры, используемые для описания вокализаций.

Параметры, используемые для описания вокализаций, можно подразделить на 3 группы: частотные, временные и энергетические. Подробно об этих параметрах звуковых колебаний можно прочесть в книге Бенаде (Benade, 1976). Частота, или высота, вокализации измеряется в Герцах (1 Гц - это одно колебание звуковой волны в 1 с); временная структура (длительности, периоды, интервалы, паузы и т.п.) - в секундах; энергетические параметры (громкость звуков) - в децибелах (дБ).

В отличие от линейно изменяющихся характеристик частоты и времени, показатели громкости имеют логарифмическую зависимость от интенсивности, поскольку при росте интенсивности звуковых колебаний (т.е. величины переносимой ими энергии) в геометрической прогрессии, субъективно ощущаемая громкость возрастает приблизительно в арифметической прогрессии. Таким образом, сигналы, отличающиеся по громкости на 10 дБ, в абсолютных значениях различаются по интенсивности в 10 раз, отличающиеся на 20 дБ - в 100 раз, на 30 дБ - в 1000 раз и т.д. На практике часто приходится ограничиваться количественными измерениями лишь частотно-временных характеристик, а интенсивность оценивать лишь на качественном уровне. Это вынужденная мера, поскольку эту чрезвычайно важную характеристику обычно трудно использовать из-за постоянных неизбежных изменений условий записи - ее уровня, расстояния до животного и его ориентации по отношению к микрофону. Звуковые волны различной частоты по-разному распространяются в окружающей среде, поэтому допустимо сравнивать между собой только интенсивности сигналов (либо частей одного сигнала), записанных при неизменных условиях, что можно сделать только в условиях лаборатории.

Сонограмма тональной вокализации.

На рисунке 4 изображена компьютерная сонограмма тональной вокализации - воя дымчатого леопарда (*Neofelis nebulosa*). Она имеет вид нескольких дугообразных полос, расположенных одна над другой. Нижняя из этих полос (в частотной области 300 Гц) называется

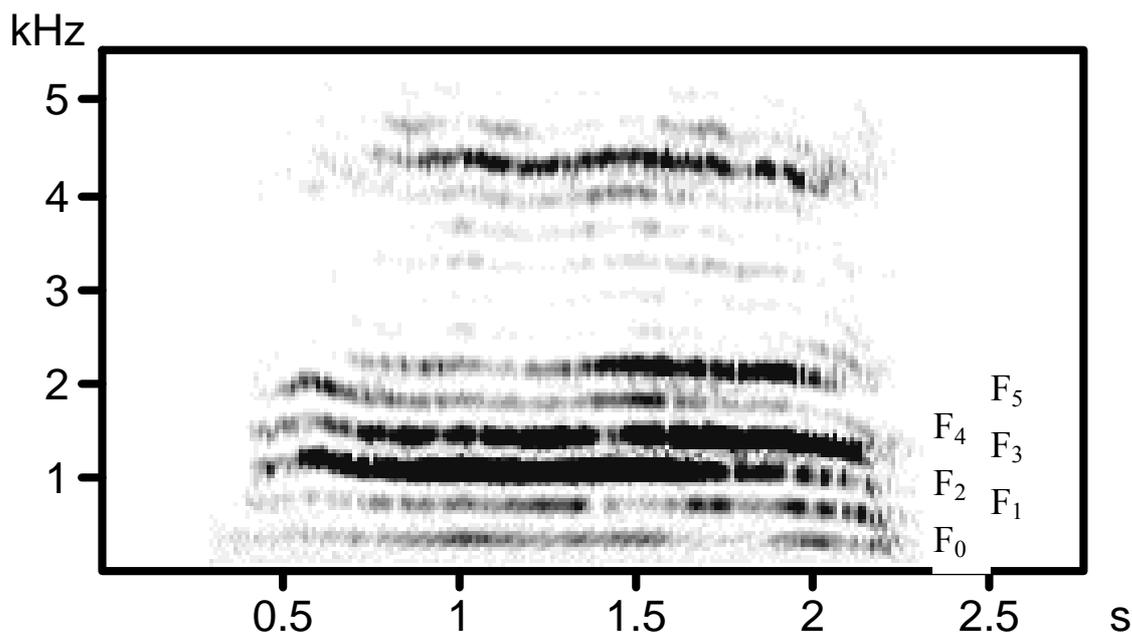


Рис. 4. Вой дымчатого леопарда - пример тональной гармонической вокализации. F_0 - основная частота сигнала (нулевая гармоника), F_1 - первая гармоника, F_2 - вторая гармоника и т.д. Видно перераспределение энергии между гармониками на протяжении сигнала: в начале сигнала доминантной является вторая гармоника, в конце - третья.

основной частотой или нулевой гармоникой крика, и традиционно обозначается F_0 . Основная частота крика представляет собой частоту колебаний голосовых связок и меняется в связи с изменениями натяжения голосовых связок. Изменение натяжения голосовых связок может изменять основную частоту в значительной степени. Остальные полосы обязаны своим появлением прохождению звуковых волн через вокальный тракт и отражению от его стенок. Они называются гармониками основной частоты и нумеруются снизу вверх (первая - F_1 , вторая - F_2 и т.д.). Частоты всех гармоник кратны основной частоте, т. е. отношение частоты любой из гармоник к основной частоте представляет собой целое число. Иногда кратность отношений между гармониками частично нарушается - это происходит в тех случаях, когда конфигурация вокального тракта сильно изменяется из-за артикуляции. Например, это происходит, когда при громком мяуканье кошка сильно раскрывает пасть (Shipley et al.,

1991). Гармоника, несущая максимум энергии (наиболее затемненная на спектрограмме), называется доминантной. Распределение энергии в спектре сигнала обычно называют его тембром.

Картину тональной гармонической вокализации могут также усложнять субгармоники и обертона - дополнительные частотные полосы соответственно под и над гармоникой, не кратные основной частоте. Они возникают при отражении звуковых волн от разнообразных поверхностей во время прохождения их по вокальному тракту, их структура сильно зависит от конфигурации вокального тракта. В силу высокой изменчивости эти характеристики при описании криков обычно не используются. Субгармоники и обертона очень характерны для мяуканья кошек, криков гусей и плача младенцев.

Специфическая характеристика именно тональных вокализаций - форма частотной модуляции. Эта характеристика отражает распределение частотных характеристик сигнала во времени. Для описания наиболее типичных тональных вокализаций обратной-U-образной формы, к которым, к примеру, относятся некоторые крики оборонительного репертуара большой песчанки (*Rhombomys opimus*) (рис. 5), обычно используют следующие параметры частоты: максимум основной частоты (F_0 макс) - самая верхняя частота, встречающаяся на протяжении сигнала; минимум основной частоты (F_0 мин, в данном сигнале совпадающий с F_0 нач) - самая нижняя частота, встречающаяся на протяжении сигнала. Разность между максимумом основной частоты и минимумом основной частоты называется глубиной частотной модуляции. Начальная основная частота (F_0 нач) - значение основной частоты в самом начале сигнала. Конечная основная частота (F_0 кон) - значение основной частоты в самом конце сигнала. Часто основную частоту сигнала выделить трудно, и для оценки частотной модуляции используют доминантную гармонику. Поскольку гармоники имеют некоторую ширину, все измерения проводятся либо по середине частотной полосы, либо каким-либо другим образом по выбору исследователя, но по возможности единообразно для всех сигналов.

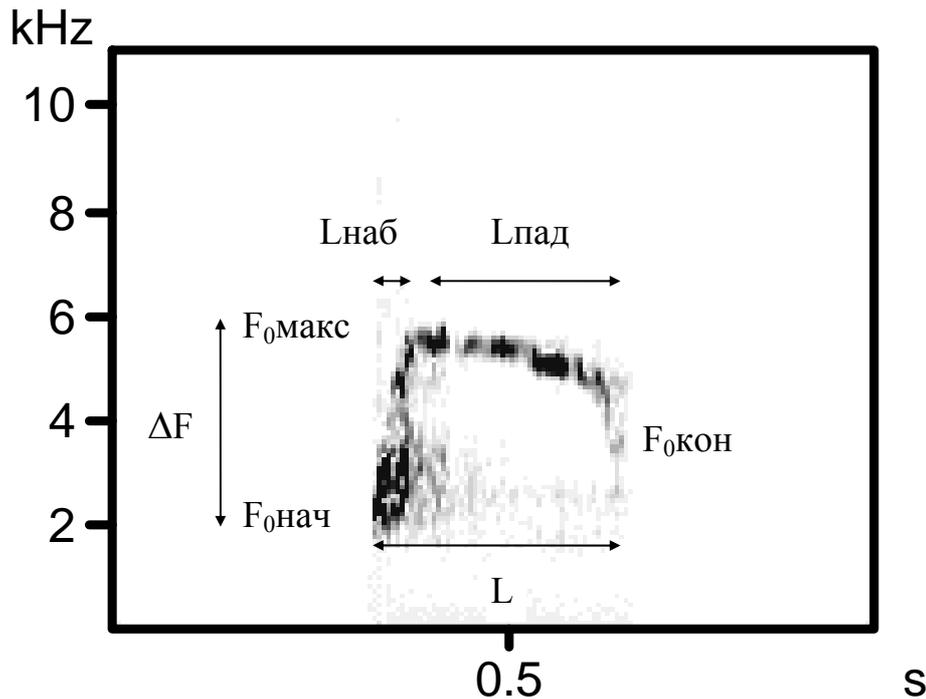


Рис. 5. Основные структурные характеристики тональных гармонических вокализаций (на примере свиста большой песчанки при оборонительном поведении). F_0 макс - максимум основной частоты; F_0 нач - начальная основная частота; F_0 кон - конечная основная частота; ΔF - глубина частотной модуляции; L - общая длительность вокализации; L наб - длительность возрастания частоты от начальной до максимальной; L пад - длительность падения частоты от максимальной до конечной.

Сложнее описывать тональные сигналы с несколькими частотными максимумами, к примеру, скуление детенышей млекопитающих, а также тональные послы очень сложной формы, встречающиеся в песнях певчих птиц. Один из подходов, применяющихся при анализе таких сигналов, состоит в измерении “соответствующих точек” частотно-временного спектра сигналов, похожих по структуре.

Временные параметры, наиболее часто используемые для описания тональных вокализаций типичной обратно-U-образной формы включают общую длительность вокализации (L), длительность набора частоты (L наб), и длительность падения частоты (L пад) (рис. 5).

Сонограмма вокализации в виде серии импульсов.

Для описания этих вокализаций удобно использовать следующие параметры (рис. 6): период пульсации (T), представляющий собой временной промежуток от начала одного импульса до начала последующего, либо частоту пульсации ($1/T$); общую длительность вокализации (L); и, приблизительно, общий частотный диапазон вокализации ($F_{\text{общ}}$). Можно также оценивать области максимальной энергии ($F_{\text{макс}}$) в спектре сигнала. В принципе, можно измерять длительности самих импульсов и интервалов между ними, но точность таких измерений обычно довольно низка, если не применять специальных режимов обработки для увеличения временного разрешения. Такие измерения могут понадобиться для решения особых задач структурного анализа и для описания сигналов обычно не нужны.

Сонограмма шумовой вокализации.

Частотный спектр шумовых сигналов практически недифференцирован, поэтому для их описания трудно предложить какие-либо параметры кроме общей длительности (L), а также приблизительных измерений общего частотного диапазона вокализации ($F_{\text{общ}}$) (рис. 7). Можно использовать также параметры, отражающие распределение энергии в спектре сигнала, к примеру, наиболее и наименее энергетически выраженные частоты.

Сонограмма промежуточной вокализации.

Очень сложны для анализа вокализации промежуточной структуры между серией импульсов и тональной, такие, как некоторые из “трещаний”, характерные для самок гепарда (*Acinonyx jubatus*) в период вождения выводков (рис. 8). В таких вокализациях звуковые импульсы в той или иной мере сливаются и анализ периода либо частоты пульсации сильно затруднен или вообще невозможен, при этом на слух подобные сигналы могут продолжать восприниматься как серии импульсов.

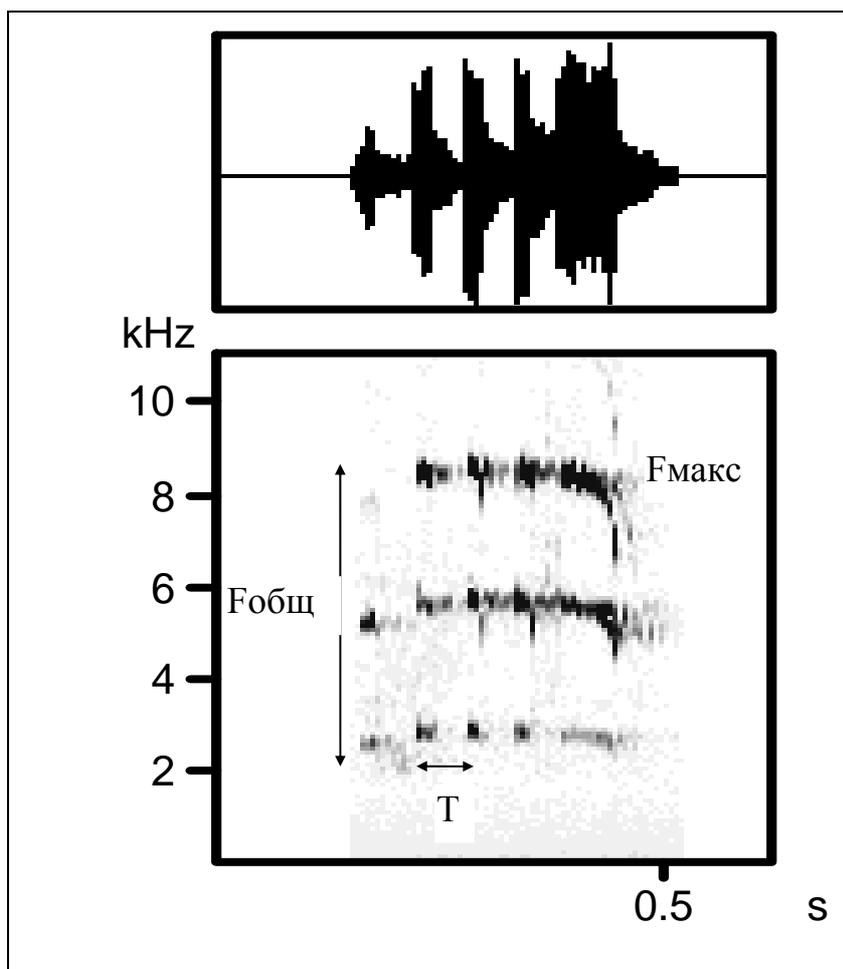


Рис. 6. Основные структурные вокализации в виде серии импульсов (на примере верещания черной коаты *Ateles paniscus*). Т - период пульсации; F общ - общий частотный диапазон вокализации; F макс - область максимальной энергии вокализации. На осциллограмме хорошо видны отдельные звуковые посылки трели.

Рис. 8. Пример вокализации промежуточной структуры между серией импульсов и тональной: “трещание” самки гепарда.

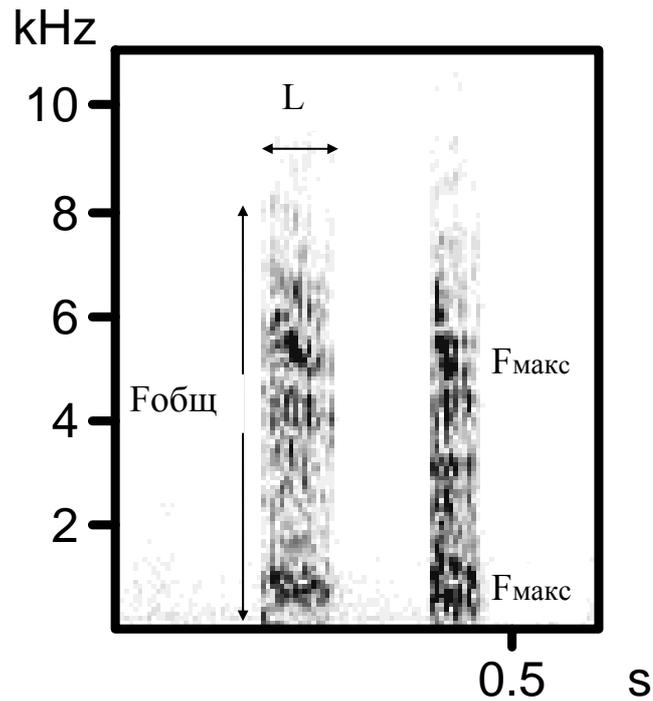
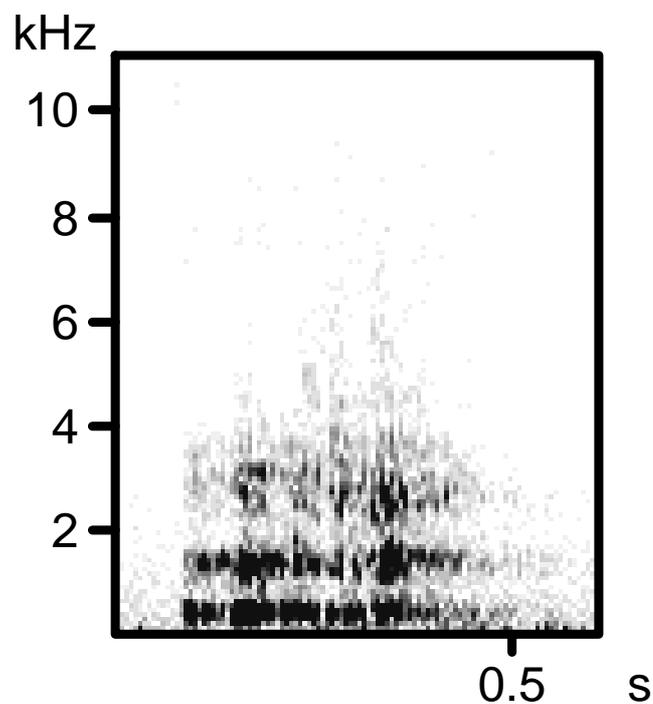


Рис. 7. Основные структурные характеристики шумовых сигналов (на примере двух вокализаций оборонительного хрюканья тушканчика-прыгуна). L - общая длительность вокализации; F общ - общий частотный диапазон; F макс - области наиболее энергетически выраженных частот.



КЛАССИФИКАЦИЯ ВОКАЛИЗАЦИЙ ПО СТРУКТУРЕ И ПО ФУНКЦИИ.

С описания вокального репертуара обычно начинается любая работа по изучению акустического поведения вида. Такие исследования часто проводят в зоопарках, потому что в неволе намного легче записать звуки и проследить сопровождающее их поведение. В литературе для описания вокальных репертуаров млекопитающих и птиц применяются различные классификационные схемы, но во всех случаях при описании вокального репертуара надо четко представлять, когда описываешь структуру, а когда - функциональное значение вокализации, и не смешивать эти два различных подхода. Однако, если применять функциональные и структурные подходы последовательно, они прекрасно дополняют друг друга.

При классификации по функциональному значению основное внимание обращают на связь вокализаций с определенным типом поведения. Так, например, можно выделить в отдельные категории звуки, сопровождающие комфортное, агрессивное, умиротворяющее, половое, материнское поведение.

При классификации по структуре принимают во внимание только физические параметры вокализаций. В этом случае вокализации подразделяют на классы, например, тональные и шумовые, а затем классифицируют по структуре более подробно, внутри каждого класса. Степень дробности классификации задает сам исследователь в зависимости от стоящей перед ним задачи, и число вокальных типов, на которые подразделяют репертуар, может варьировать очень широко - от нескольких единиц до нескольких десятков.

При классификации вокализаций по структуре вокальные типы обычно не могут быть жестко разделены между собой, так как почти между всеми вокальными формами встречаются промежуточные варианты. Таким образом, разные типы вокализаций, с одной стороны, представляют собой дискретные единицы, а, с другой, все входящие в них вокализации, благодаря переходным формам, связаны в один или несколько структурных континуумов. Пример описания

последовательности шагов при классификации вокализаций по структуре приведен в работе Юргенса (Jurgens, 1982).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

Сейчас прикладная биоакустика переживает новый этап - компьютеры, звуковые карты и программы анализа звука становятся все доступнее. Благодаря этому все большее число людей, работающих с животными в неволе, получают возможность ознакомиться с новыми биоакустическими методами и начать использовать их на практике, наряду с другими, ставшими уже традиционными подходами. Приведенные в этой статье сведения достаточны для того, чтобы неспециалист мог при необходимости самостоятельно сделать магнитную запись интересующих его звуков животных, определить их структуру, выделить ключевые параметры и применить полученные данные в соответствии со стоящей перед ним задачей. Следует ожидать, что с распространением информации о новых возможностях все большее число работников зоопарков станут применять биоакустические методы. В свою очередь, это поможет расширить число видов, для которых эти методы могут быть применены, и будет способствовать появлению новых идей в прикладной биоакустике.

БЛАГОДАРНОСТИ.

Авторы приносят искреннюю благодарность Е. С. Воробьевой, Т. В. Воробьевой, М. Е. Гольцману, О. Г. Ильченко, В. В. Корбуту, Е. П. Крученковой и С. В. Попову, взявшим на себя труд прочитать рукопись и сделавшим ряд ценных замечаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Биоакустика (под ред. В. Д. Ильичева) // М., 1975, 257 с.
2. Богословская Л. С., Солнцева Г. Н. Слуховая система млекопитающих // М., Наука, 1979, 240 с.

3. Володина Е. В., Володин И. А. Биоакустические исследования в зоопарках - возможности и перспективы // В сб. "Научные исследования в зоологических парках", М., 1995, вып. 5, с. 222-246.
4. Згут М. А. Мой друг магнитофон // М., Радио и связь, 1982, 224 с.
5. Курсков А. Н. Рукокрылые охотники // М., Лесная промышленность, 1978, 136 с.
6. Мариковский П. И. С магнитофоном в природу // Алма-Ата, "Наука", 1983, 128 с.
7. Морозов В. П. Занимательная биоакустика // М., "Знание", 1987, 208 с.
8. Попов С. В., Вахрушева Г. В. Этологические исследования в зоопарках и проблема поведенческой адаптации животных к условиям неволи // В сб. "Научные исследования в зоологических парках", М., 1993, вып. 3, с. 171-192.
9. Попов С. В., Ильченко О. Г. Методические рекомендации по этологическим наблюдениям за млекопитающими в неволе // М., 1990, 76 с.
10. Сергеев Б. Ф. Живые локаторы океана // Л., Гидрометеиздат, 1980, 151 с.
11. Benade A. H. Fundamentals of musical acoustics // New York, Oxford Univ. Press, London, Toronto, 1976, 596 pp.
12. Frazer Sissom D. E., Rice D. A., Peters G. How cats purr // J. Zool., 1991, v. 221, N 1, p. 67-78.
13. Golani I. Homeostatic motor processes in mammalian interactions: a choreography of display // Perspectives in Ethology, v. 2, Bateson P.P.G, Klopfer P.H. (eds.), N.Y., Plenum Press, 1976, p. 69-134.
14. Golani I. A mobility gradient in the organization of vertebrate movement: the perception of movement through symbolic language // Behav. and Brain Sci., 1992, v. 15, p. 249-308.
15. Grisham J. Cheetah husbandry // AAZPA Species Survival Plan Program. Materials of Propagation Group, 1989.

16. Grisham J., Lindburg D. G. Cheetah Master Plan // AAZPA Species Survival Plan Program. Materials of Propagation Group, 1989.

17. Jurgens U. A neuroethological approach to the classification in the squirrel monkey // Primate communication, Snowdon C. T., Brown C. H., Petersen R. M. (eds.), Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1982, p. 50-62.

18. Jurgens U. Central control of monkey calls // Primate vocal communication, Todt D., Goedeking P., Symmers D. (eds.), Berlin, 1988, p. 162-167.

19. Shipley C., Carterette E. C., Buchwald J. S. The effects of articulation on the acoustical structure of feline vocalizations // J. Acoust. Soc. Amer., 1991, v. 89, N 2, p. 902-909.

SUMMARY.

Volodin I. A., Volodina E. V. How to study animal vocal behavior in zoos: practical recommendations. Current zoo biology uses a number of bioacoustical approaches in animal management practice. This paper provides an essential information about animal sounds, their production, functions, technics of recording, marking, preservations and computer analysis. Similarities and differences between animal and human vocal behavior are sketched. Some basic data about sound recording equipment and materials and sound analysis computer software are provided. Basic structural characteristics of mammal sounds and their ways of measuring are described.